Une histoire de la chimie atmosphérique globale

Régis Briday

▶ **To cite this version:**

Régis Briday. Une histoire de la chimie atmosphérique globale : Enjeux disciplinaires et d'expertise de la Couche d'ozone et du Changement climatique. Histoire, Philosophie et Sociologie des sciences. Ecole des hautes études en sciences sociales, 2014. Français. NNT : 11082304 . tel-01213826

HAL Id: tel-01213826

https://theses.hal.science/tel-01213826

Submitted on 10 Oct 2015

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

École des hautes études en sciences sociales (EHESS)
Formation doctorale : « Sciences, techniques, savoirs : histoire et société »
Centre Alexandre Koyré

Thèse
Pour l'obtention du titre de docteur de l'EHESS en sciences sociales
Spécialité « Histoire des sciences et des techniques »

Une histoire de la chimie atmosphérique globale

Enjeux disciplinaires et d'expertise de la Couche d'ozone et du Changement climatique

TOMES 1 & 2

Présentée par

Régis Briday

Soutenance : le 18 décembre 2014

Jury :

Amy DAHAN – Directrice de Recherche Emérite au CNRS, Centre Alexandre Koyré, Paris (directrice de thèse)

Sophie GODIN-BEEKMANN – Directrice de Recherche au CNRS, LATMOS (Laboratoire Atmosphères, Milieux, Observations Spatiales), Paris (co-directrice de thèse)

David AUBIN – Professeur à l'UPMC (Université Pierre et Marie Curie), Paris (rapporteur)

Matthias DÖRRIES – Professeur à l'Université de Strasbourg (rapporteur)

Paul EDWARDS – Professeur à l'Université du Michigan (examinateur)

Dominique PESTRE – Directeur d'études à l'EHESS (examinateur)

Remerciements

Parmi les nombreux enseignements qu'un travail de thèse délivre à son auteur, il y a celui-ci : tout défini que soit l'objet d'étude, le temps nécessaire pour en venir à bout est infini. Ainsi, le doctorant apprend à montrer son érudition, tout en sachant "ne pas trop en dire "… afin qu'on ne puisse pas aisément lui reprocher de "ne pas en avoir dit assez". Fidèle à ce précepte, et sans doute également par pudeur, je n'évoquerai pas les affres dans lesquelles l'écriture de cette thèse, qui s'est étirée sur une durée de presque six ans, a plongé son auteur et son entourage. Le lecteur de ce mémoire de thèse les connaît sans doute. Quant à mes proches, que j'ai mis à l'épreuve, qu'ils me pardonnent ma lenteur, et qu'ils soient (infiniment) remerciés de leur patience (limitée) et de leur (érodable, mais néanmoins solide) soutien. Anne, un immense, immense merci.

Je souhaite, par ailleurs, remercier bien sûr les personnes et institutions qui ont rendu cette production possible. Tout d'abord, ma reconnaissance va à mes deux (co-)directrices de thèse. Elles ont su, chacune à sa manière, jeter un œil critique sur mon travail tout en m'encourageant dans les moments difficiles.

Je remercie très chaleureusement Amy Dahan de m'avoir accompagné, avec la grande bienveillance que tous ses doctorants lui connaissent, depuis les premières étapes de la conception de mon projet de thèse jusqu'à ses dernières semaines des plus éprouvantes. Nos échanges ont modelé la forme de ma thèse (malgré mes inerties, mes tropismes vers certains points qui ne sont pas au centre de ses préoccupations de chercheur). Amy m'a, de plus, impliqué dans les séminaires du Centre Alexandre Koyré, et fait intervenir également dans deux journées de travail internationales – l'une sur l'ozone stratosphérique et le changement climatique ("Ozone Studies and Global Climate Change – New Historical and Political Perspectives" ; 8 juin 2010 ; Paris), l'autre sur la géoingénierie ("Geoengineering on the climate change agenda" / « La géoingénierie sur l'agenda du changement climatique » ; 11 octobre 2013 ; Paris). Sans son soutien, sans son exigence, ce travail sur "la chimie de l'atmosphère globale" n'aurait pas été mené à son terme.

Je remercie également très chaleureusement ma seconde directrice de thèse, Sophie Godin-Beekmann. Qu'elle reçoive ma gratitude et ma considération, pour s'être prêtée à un jeu difficile de décentrement, elle qui, en tant que "chimiste de l'atmosphère globale" de métier, est une actrice de l'histoire que j'ai entrepris d'écrire. Je lui sais gré d'avoir pris le temps de lire des travaux en chantier, qui n'appartenaient pas à son champ académique. Ses relectures m'ont été bénéfiques sur le plan de l'exactitude de points relatifs

à son champ d'étude. Sophie m'a, en outre, poussé à m'intéresser aux débuts de la chimie de l'ozone stratosphérique, ce qui m'a conduit en définitive à produire un travail moins centré sur les années 1980-…, comme initialement conçu, et plus sur les décennies précédentes. Je la remercie en outre de m'avoir mis en contact avec ses collègues en région parisienne : au LATMOS, où j'ai pu longuement discuter avec Slimane Bekki, Claire Granier et Alain Hauchecorne ; au LISA, où j'ai rencontré Matthias Beekmann. Enfin, Sophie m'a permis de me rendre, entre le 28 juin et le 2 juillet 2010, à la rituelle Rencontre internationale des Diablerets, village suisse alpin où sont traditionnellement finalisés les rapports internationaux sur l'ozone stratosphérique soutenus par l'ONU. J'ai pu y discuter avec Donald Wuebbles, Richard Stolarski, Thomas Peter, ou encore Susan Solomon. Que toutes ces personnes soient, à leur tour, remerciées de m'avoir offert un peu de leur temps. Leur témoignage m'a été précieux, afin d'identifier les étapes et les individus qui avaient été importants dans la construction de leur(s) communauté(s) scientifique(s).

J'associe à ma liste de remerciements les organisateurs et les participants des journées de travail et séminaires, au cours desquels j'ai pu soumettre des parties de ma thèse à la sagacité d'un public averti, et profiter de l'érudition et des réflexions des intervenants. Les échanges avec mes collègues du Centre Alexandre Koyré revêtent une importance particulière. Nombreux sont ceux parmi eux qui ont collaboré, plus ou moins sciemment, à l'écriture de cette thèse.

Une thèse ne peut pas s'écrire sans soutien financier. Le GIS Climat Environnement Société a ainsi financé les trois premières années de mon travail, ainsi qu'une partie importante de mon séjour aux Diablerets. Son soutien fut le prérequis à ce travail. Merci aux personnes du GIS Climat qui ont soutenu mon projet (projet qui était nommé « EPI-C3 » au sein du GIS Climat). L'IFRIS (Institut Francilien Recherche Innovation et Société) m'a permis de participer à son Ecole doctorale 2010, à Florence (à la Villa Finaly, du 16 au 18 septembre 2010). Je remercie également l'Ecole d'ingénieurs ESIEE de Noisy-le-Grand, qui m'a confié ses étudiants pendant trois ans, en me laissant une pleine liberté d'enseignement de l'Histoire des sciences et des techniques. Le Centre Alexandre Koyré et le CNRS, enfin, m'ont offert leur soutien généreux, à la fois financier et administratif, tout au long de mon travail.

Pour finir, j'exprime ma gratitude aux membres du jury, pour avoir accepté de se prêter à l'exercice de lecture de ma (longue) thèse, et pour avoir consenti pour certains à faire un long voyage afin d'assister à ma soutenance. La prime revient à Paul Edwards, venu des Etats-

Unis, et qui a de surcroît fait l'effort de lire un long document dans une langue qu'il pratique seulement de manière occasionnelle. Un grand merci également à David Aubin et Matthias Dörries, qui ont promptement donné leur accord pour endosser le rôle de rapporteur de mon mémoire de thèse. Enfin, je remercie vivement Dominique Pestre, dont la contribution à la recherche au Centre Alexandre Koyré est remarquable, jusque dans ses recensions critiques des travaux des étudiants du Centre.

Régis Briday, le 6 octobre 2014

Avertissements

Le Plan de notre thèse est étagé sur cinq niveaux : des "Parties" (désignées par une lettre) ; des "Chapitres" (numérotés) ; des "Sous-chapitres" (numérotés par deux nombres séparés par un point) ; des "Sections" (en caractères gras) ; des "Sous-sections" (en caractères gras et en italique). Nous avons cherché à homogénéiser les formats des chapitres et des sous-chapitres, autour de 60 pages et 20-30 pages, respectivement. Subsistent toutefois des "anomalies". Ainsi, le Chapitre 5 fait plus de cent pages, alors que le Sous-chapitre 7.2 n'excède pas quelques pages. Ceci s'explique par notre souci de générer, avant toute chose, un plan général qui mette en avant les grandes mutations de la chimie atmosphérique globale et/ou des thématiques importantes. Lorsque notre étude n'a pas d'antécédent dans la littérature secondaire (par exemple, au sujet de Richard Scorer dans le Chapitre 5), nous déployons naturellement longuement notre analyse. Dans le cas contraire, nous vérifions, reformulons et complétons les conclusions de nos pairs, avant de renvoyer le lecteur à leurs travaux (par exemple, au sujet de la construction de l'image du "trou de la couche d'ozone" par la NASA, et l'invocation du principe de précaution lors des négociations du Protocole de Montréal, dans le Sous-chapitre 7.2).

Autres remarques au sujet de la forme :

- Nous avons utilisé les signes topographiques « … » pour les citations (l'équivalent des 'quotation marks' des anglophones), "…" pour des expressions que l'usage a consacrées (l'équivalent des 'inverted commas' des anglophones), et '…' pour signaler l'emploi d'un terme dans une langue étrangère.
- Les termes en italique sont des mots ou expressions que nous avons voulu souligner, ou des titres d'ouvrages. Les titres d'articles ont été mis entre guillemets, comme il est conventionnellement d'usage.
- Afin de gagner du temps, nous avons laissé des citations en langue anglaise dans quelques notes de bas de page – dans la mesure où le lecteur de cette thèse est nécessairement anglophone.
- Nous avons renvoyé de nombreux détails biographiques et techniques en note de bas de page. A ce propos, le lecteur choisira de lire, ou non, ces notes. Elles possèdent des fonctions multiples – elles sont, souvent, des citations servant de preuves à notre récit, ou le détaillant plus avant. La compréhension du corps du texte ne nous semble nullement conditionnée par la lecture des notes de bas de page.

Sommaire

INTRODUCTION GENERALE……13

PARTIE A. *1900-1970.* LE PARADIGME D'UNE COUCHE D'OZONE EN EQUILIBRE……39

Chapitre 1. *1900-1940*. L'ozone stratosphérique, nouvel objet des géophysiciens et météorologistes……43

1.1. Les premiers réseaux de mesure de l'ozone stratosphérique……45

1.2. La formalisation des réactions chimiques dans la haute atmosphère……..64

1.3. La compartimentation disciplinaire des sciences de l'atmosphère……...87

Chapitre 2. *1940-1970*. La stratosphère nouvelle des sciences belligérantes……105

2.1. Le couplage de la stratosphère à la circulation générale de l'atmosphère et au climat global……...109

2.2. Une stratosphère contaminée chimiquement par les activités au sol…….……..127

2.3. Des évènements atmosphériques massifs et subits pouvant potentiellement affecter l'ozone…….……138

2.4. Harry Wexler : « nous pouvons détruire la couche d'ozone »……..…….142

Chapitre 3. Les origines "pacifiques" d'un réseau mondial de surveillance de la composition chimique de l'atmosphère……155

3.1. La construction ICSU/OMM d'un système d'observation globale de l'ozone…..…159

3.2. La veille internationale du SO_2 et des pollutions acides transfrontières…….191

CONCLUSION DE LA PARTIE A……..……..224

PARTIE B. *1970-1984.* LA CONTROVERSE SOCIOTECHNIQUE ETATS-UNIENNE SUR LA DESTRUCTION DE L'OZONE……239

Chapitre 4. Des chimistes lanceurs d'alerte……245

4.1. La controverse sur les avions supersoniques aux Etats-Unis (1970-71)……..…249

4.2. L'alerte sur les CFC de Mario Molina et Sherwood Rowland (1974)……..288

Chapitre 5. Les opposants aux réglementations des CFC……313
5.1. La riposte de l'Industrie……..320
5.2. Le météorologiste Richard Scorer et le géochimiste James Lovelock, deux contradicteurs issus de la recherche publique……..……342
5.3. Le Scorer "politique" : la crise environnementale comme crise politique et culturelle d'un monde globalisé……378
5.4. L'armistice de la guerre de l'ozone……417

Chapitre 6. De l'affaire de l'ozone à la science holiste du système Terre……435
6.1. La chimie stratosphérique devient un enjeu central pour les aéronomes et les scientifiques des atmosphères planétaires……...……..438
6.2. Les prémices d'une science du Système Terre. L'exemple de la NASA……...…463
CONCLUSION DE LA PARTIE B……..……....487

PARTIE C. *1977-2013*. UNE EXPERTISE INTERNATIONALE, ENTRE COUCHE D'OZONE, CHANGEMENT CLIMATIQUE ET QUALITE DE L'AIR……499

Chapitre 7. *1977-92.* L'expertise internationale sur l'ozone comme expérience fondatrice……503
7.1. L'experience scientifique et politique de construction d'une expertise internationale sur l'ozone (1977-1989)…….…...506
7.2. Trou de la couche d'ozone et signature du Protocole de Montréal (1987)…….……...…527

Chapitre 8. L'interface chimie atmosphérique - changement climatique dans les rapports internationaux……535
8.1. Introduction : « régime climatique » et communauté scientifique……..540
8.2. Les substituts des CFC dans le Protocole de Kyoto et le changement climatique dans la gouvernance de l'ozone……....549
8.3. Chimie troposphérique et changement climatique. L'exemple de l'introduction des modèles de chimie dans les rapports du GIEC……568

Chapitre 9. De l'importance climatique des GES de courte durée de vie et des émissions soufrées……..……623

9.1. Réduire des émissions de GES de courte durée de vie afin de se maintenir sous les « +2°C »……...…625

9.2. La réduction des émissions soufrées : un « dilemme politique » ?.....639

CONCLUSION GENERALE……..649

Bibliographie……661

Introduction générale

Depuis une vingtaine d'années, le constat d'accroissement des pollutions atmosphériques dans certaines régions du monde et à l'échelle mondiale est devenu récurrent dans les médias. D'une part, la mauvaise qualité de l'air et les pluies acides sont l'objet de plaintes croissantes dans les pays en développement, en particulier dans les Grands pays émergents. En outre, lorsque le trafic automobile et les activités industrielles sont importantes, et les conditions météorologiques favorables à sa formation, un smog photochimique, semblable à celui originellement étudié à Los Angeles dans les années 1950, emplit encore aujourd'hui épisodiquement de nombreuses grandes agglomérations européennes et nord-américaines. D'autre part, les bilans d'échec se multiplient au sujet de la gouvernance internationale des gaz à effet de serre (GES), alors que le changement climatique est devenu le plus haut étendard de la "crise environnementale" (ou "crise écologique") dans laquelle nous vivrions depuis les années 1970 au moins.

La destruction anthropique de l'ozone, les pluies acides et le changement climatique ont été mis à l'agenda politique international entre la fin des années 1970 et le début des années 1990. Ils exemplifient ces « nouveaux risques » qu'Ulrich Beck a décrits dès le milieu des années 1980 dans *la Société du risque* : des risques qui brouillent les frontières géopolitiques nationales, du fait des répercutions extra-nationales des activités des pollueurs [Beck, 2008 (1986)]. Le consensus scientifique sur le caractère "transfrontière" ou "global" des pollutions atmosphériques a justifié le renforcement et la réorientation de la coopération entre scientifiques de l'atmosphère de pays différents. Dans un contexte de négociations diplomatiques entre pays au sujet de la règlementation des pollutions transfrontières et globales, une telle collaboration internationale a été pensée en vue notamment de lever les soupçons de "science étrangère au service des intérêts de son pays", de générer dans un nombre maximal d'Etats des élites scientifiques nationales qui pourraient relayer des alertes environnementales, voire de porter sur l'environnement atmosphérique un discours commun à l'ensemble de la communauté scientifique internationale.

Les grands rapports d'experts internationaux soutenus par l'ONU constituent aujourd'hui les textes de référence en matière de conseil à la gestion politique des pollutions atmosphériques. En ce qui concerne les pollutions atmosphériques dites globales, les 'Scientific Assessments of Ozone Depletion' et les rapports du Premier groupe de travail du

GIEC (Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat)[1] servent de "base scientifique" aux négociations diplomatiques sur les pollutions responsables de la destruction de la couche d'ozone et du changement climatique, respectivement. La réalisation de travaux interdisciplinaires, la cooptation d'acteurs provenus d'un nombre de pays le plus important possible, ou encore la coopération entre experts de la recherche publique (majoritaires) et de la recherche privée (industriels, ONG, groupes de conseil sur l'environnement, 'think tanks', *etc.*), comptent parmi les pratiques des experts des 'Assessments of Ozone Depletion' et du GIEC. Ces procédures incarnent une manière de cohabiter qu'ont co-construite des décideurs politiques, des scientifiques (scientifiques de l'atmosphère, écologues, épidémiologistes, *etc.*), des membres d'agences et de ministères de l'environnement, des membres d'organisations onusiennes, des représentants de la société civile, des industriels, des ingénieurs, *etc.* depuis les années 1980.

Cette institutionnalisation n'a pas manqué de charrier derrière elle son lot de critiques. La construction de la preuve et du consensus scientifique, les prises de parole des scientifiques de l'atmosphère dans les arènes extra-scientifiques, les raisons justifiant leurs financements, l'intrication des savoirs scientifiques et économiques pour générer des futurs possibles à l'aide de modèles numériques dits "intégrés", ou encore l'utilisation des savoirs scientifiques dans la prise de décision des élus, ont suscité de nombreux commentaires, de la part de militants "environnementalistes" et "altermondialistes", de « marchands de doute » aux Etats-Unis (*cf.* Oreskes & Conway, 2010), d'"économistes atterrés" en France, *etc*… et, bien sûr, de la part des scientifiques de l'atmosphère eux-mêmes, ainsi que des auteurs en sciences humaines et sociales (SHS).

Dans ce mémoire de thèse, nous interrogeons les constructions d'un *environnement global*, et en particulier les constructions d'*expertises* sur la destruction de l'ozone et le changement climatique, *par des acteurs scientifiques particuliers* : les *chimistes de l'atmosphère*. Nous le faisons dans une *perspective transnationale et de longue durée*. Notre récit débute avec les premiers travaux de chimie atmosphérique dans les années 1920 et s'achève au début des années 2010. Notre travail se situe au carrefour de plusieurs traditions de SHS : l'histoire des sciences sur la longue durée, centrée sur un champ scientifique; les STS ('Science and Technology Studies', ou « Sciences, Techniques et Société ») ; et, de manière plus indirecte, l'histoire environnementale. Le cœur de notre récit porte sur l'évolution des pratiques scientifiques de la chimie atmosphérique globale, les reconfigurations disciplinaires et

[1] La traduction de 'Scientific Assessments of Ozone Depletion' qui prévaut en France est « Evaluation scientifique de l'appauvrissement de la couche d'ozone ». Et, en anglais, le GIEC devient l'IPCC, pour 'Intergovernmental Panel on Climate Change'.

sociales, et l'apparition de nouvelles formes d'expertise et de figures d'expert propres à ce champ d'étude.

Une histoire sociale "mondiale et sur le long terme" d'un champ et d'une communauté scientifique jette nécessairement certaines traditions nationales et certains acteurs sur le devant de la scène, alors qu'il en laisse d'autres dans l'ombre. En outre, nous avons dû choisir d'interroger des *moments* particuliers. D'abord, les décennies 1940-60. Premier grand moment de métamorphose de la stratosphère, elles sont un lieu de grandes mutations dans les pratiques scientifiques. Ensuite, les années 1970, théâtre des premières controverses sur l'ozone aux Etats-Unis, sont également celles où sont popularisées les théories des Limites de l'environnement (en particulier, les limites des ressources fossiles globales et la perturbation de cycles biochimiques à grande échelle). Enfin, les années 2000 sont marquées par le constat "d'échec" de la gouvernance internationale du changement climatique, qui avait pourtant été largement inspirée de la gouvernance "à succès" de l'ozone. Ajoutons que les années ~1985-92 sont le seul moment de l'histoire de la chimie atmosphérique globale à avoir été étudié en détail par les historiens des sciences (Conway, 2008 ; Grevsmuehl, 2012 ; Christie, 2000) et les sciences politiques (Haas, 1992 (2) ; Litfin, 1994 ; Parson, 2003). Aussi, pour cette période, nous mettrons uniquement en avant certains points particuliers, nécessaires pour "faire la jonction" entre les années 1970 et les années 1990-2000.

Dans les deux sections qui suivent, nous définissons les notions qui viennent d'être introduites, et justifions notre approche méthodologique générale.

L'objet "chimie atmosphérique globale"

Ce qui donne une cohérence à notre récit, c'est le suivi de l'évolution d'acteurs et de pratiques apportant leur contribution à la chimie atmosphérique globale. Nous désignons par les termes "chimie atmosphérique", un champ d'étude – devenu une discipline scientifique, ou une sous-discipline des sciences de l'atmosphère dans certains pays, à partir de la fin des années 1970 – qui *crée et utilise des formalisations des réactions chimiques se produisant dans l'atmosphère*.[2] Aux côtés des phénomènes physiques et/ou météorologiques (transport des polluants, lessivage des espèces atmosphériques par les précipitations) et des phénomènes d'interactions chimiques entre, d'une part, l'atmosphère, et, d'autre part, la biosphère (dont l'anthroposphère), la lithosphère ou les océans, les réactions chimiques

[2] La "composition chimique de l'atmosphère" est parfois désignée également par les termes "chimie atmosphérique" (et, de même, par 'atmospheric chemistry', dans la littérature en langue anglaise). On trouve cette seconde acception de "chimie atmosphérique" dans la littérature scientifique avant la première formalisation des réactions chimiques dans l'atmosphère (que nous avons fixée à 1929, année de la première présentation du cycle de destruction / production de l'ozone stratosphérique par Sydney Chapman), et jusqu'à nos jours.

atmosphériques constituent le troisième facteur de modification de la composition de l'atmosphère.

Aux yeux du chimiste de l'atmosphère d'aujourd'hui, les processus chimiques atmosphériques influent de manière importante sur le temps de résidence des espèces atmosphériques. Les transformations chimiques atmosphériques génèrent en outre certains polluants troposphériques dangereux (l'ozone, l'acide nitrique, l'acide sulfurique). Les processus chimiques impliqués sont multiples (par exemple, plusieurs milliers de réactions peuvent être jugées pertinentes pour la seule oxydation des composés organiques en phase gazeuse), et de natures très diverses (par exemple, l'oxydation radicalaire en phase gazeuse initiée par le rayonnement solaire, l'oxydation en phase aqueuse au sein des gouttelettes nuageuses, la chimie hétérogène à la surface des aérosols). Aux yeux des scientifiques, cette complexité justifie le recours indispensable aux modèles numériques, tant pour leur rôle « diagnostique » (exploitation et interprétation des données de "terrain" ou de laboratoire) que pour leur rôle « pronostique » (prévision des évolutions, études d'impact, développement de stratégie de réduction des émissions). [Aumont, 2005, pp. 9-10]

Les savoirs sur les transformations chimiques atmosphériques pertinentes pour rendre compte de phénomènes ayant des implications planétaires se sont développés intensément, seulement depuis la première alerte à la destruction chimique de l'ozone stratosphérique, en 1970. Et, de fait, la plupart des figures influentes de la chimie atmosphérique globale d'aujourd'hui ont fait leurs premières armes et tirent une partie importante de leur autorité des travaux sur la destruction de la couche d'ozone qu'ils ont initiés dès les années 1970. Ainsi, Guy Brasseur, Susan Solomon, Ralph Cicerone, Donald Wuebbles, et les trois chercheurs qui se sont partagés le Prix Nobel de chimie 1995 pour leurs travaux sur l'ozone stratosphérique : Paul Crutzen, Mario Molina et Sherwood Rowland.

En outre, la chimie de l'ozone stratosphérique est la plus ancienne chimie atmosphérique. Les chimistes de l'atmosphère retiennent en général l'année 1929 comme l'année de la pose de la première pierre à l'édification de la chimie atmosphérique, dans la mesure où c'est au cours de cette année que l'astronome et géophysicien anglais Sydney Chapman présenta pour la première fois publiquement son schème de destruction / production photochimique de l'ozone stratosphérique, au cours d'une conférence sur l'ozone qui se tint à Paris. La première chimie atmosphérique porta donc sur un objet, la couche d'ozone, défini comme recouvrant l'ensemble du globe. En cela, nous pouvons la qualifier de « globale ».

De manière plus générale, nous qualifierons de "*global*", tout phénomène que les sciences de la nature définissent comme global, c'est-à-dire tout phénomène qu'elles

identifient comme pouvant avoir des répercussions sur, et/ou être affecté par, une entité définie comme cohérente (et donc, aux paramètres quantifiables) sur l'ensemble (ou presque l'ensemble) des latitudes et des longitudes (par exemple, la concentration de l'ozone dans la "couche d'ozone" stratosphérique, les populations humaines où qu'elles se trouvent, la température moyenne de l'atmosphère, les dynamiques atmosphériques à grande échelle), ou tout phénomène provenant d'une région quelconque pouvant affecter une grandeur propre à une autre région quelconque de la planète (par exemple, des polluants charriés par la "circulation" océanique ou atmosphérique formalisée pour l'ensemble du globe, dont les polluants qui transitent depuis les pays des moyennes latitudes nord jusqu'à la stratosphère arctique ou antarctique pour y affecter l'ozone).

Autre exemple de pollution globale, plus récemment apparue dans la littérature scientifique : les « sources globales de la pollution locale » de l'air. Un rapport récent du 'National Research Council of the US National Academies' porte même spécifiquement sur ces pollutions. Il prend en compte des aspects dynamiques (transport de polluants anthropiques et naturels – particules solides PM, polluants organiques persistants, mercure, monoxyde de carbone), mais également des aspects chimiques, par exemple les processus chimiques qui induisent une augmentation des concentrations moyennes hémisphériques voire globales de polluants secondaires (ozone troposphérique, aérosols soufrés) [*NCR*, 2009]. Aujourd'hui, certains scientifiques n'hésitent plus à faire usage du concept de « qualité de l'air global ('global air quality') » pour souligner l'augmentation de la pollution troposphérique de fond [*IPCC (WG I)*, 2007 & 2014]. Dès 2001, les auteurs du GIEC écrivaient : « au 21ème siècle, une perspective globale sera nécessaire pour atteindre les objectifs de qualité de l'air régional » [*IPCC (WG I)*, 2001, p. 279].

La chimie atmosphérique s'appuie, premièrement, sur une tradition de *chimie de laboratoire* (notamment, des mesures de vitesse de réaction chimique dans différentes conditions physico-chimiques contrôlées). Elle s'appuie, deuxièmement, sur des *mesures de terrain* : recueil d'échantillons de composés tombés sur la surface terrestre ; recueil d'échantillons dans l'atmosphère à l'aide d'avions, de ballons, de fusées, *etc.* ; mesures des spectres atmosphériques à l'aide de spectromètres, radars, lidars, *etc.* situés au sol, ou à bord d'avions et de satellites. Rares sont les "expérimentations" 'in situ', *i.e.* les mesures dites « destructrices » (c'est-à-dire qui ne laissent pas les propriétés du lieu inchangées une fois le travail scientifique accompli) ; en effet, l'interdit de s'adonner à de telles pratiques est profondément ancré dans la culture des sciences de l'atmosphère et du climat (même si les États-Unis et l'URSS ont offert de nombreux exemples de transgression au cours des décennies 1950-60, et même si la géoingénierie climatique tente aujourd'hui certains

atmosphériciens [Fleming, 2010]). Troisièmement, si la chimie de laboratoire fait largement usage de modèles numériques depuis une vingtaine d'années, la chimie de l'atmosphère a quant à elle développé précocement des *modèles numériques*, dès les années 1960, en emboîtant le pas des météorologistes qui s'étaient lancés dans cette pratique une quinzaine d'années auparavant (les Jule Charney, John von Neumann et Harry Wexler ayant alors été des précurseurs de la simulation informatique de phénomènes naturels et même, plus généralement, physiques).

Comme nous l'avons laissé transparaître dans les exemples précédemment donnés, la grande majorité des chercheurs participant à la formalisation d'une atmosphère chimiquement réactive se veulent des scientifiques de l'atmosphère, bien avant d'être des chimistes au sens où l'entendent traditionnellement les historiens de la chimie, pour lesquels le cœur de l'identité de la chimie est à chercher dans les pratiques de transformation des matériaux au sein du laboratoire [Bensaude-Vincent & Stengers, 2001 (1991)]. Les chimistes de l'atmosphère sont même rarement des chimistes de formation. De plus, ils mènent toujours de front des travaux plus spécifiquement focalisés sur les interactions chimiques, et des travaux plus centrés sur la dynamique atmosphérique et les climats. Ils publient la plupart du temps dans des revues transdisciplinaires sur l'atmosphère, dans des revues de biogéochimie et de géophysique, ou dans des revues consacrées aux pollutions anthropiques. En effet, la question que se pose le plus souvent un chimiste de l'atmosphère porte sur le devenir d'une ou plusieurs *espèces chimiques particulières*. Il lui faut pour cela identifier les « sources » chimiques de ces espèces, ainsi que ses « puits ».[3] Or, outre les puits chimiques dans l'atmosphère, c'est-à-dire les réactions chimiques qui transforment une espèce chimique au sein même de l'atmosphère, il faut également déterminer quels sont les autres puits, au sol. Leur localisation dépend de la dynamique des masses d'air, des précipitations, ou encore de leur captation par les espèces biologiques terrestres et marines.

La plupart des chimistes de l'atmosphère travaillent aujourd'hui dans des laboratoires de la recherche publique, où ils cohabitent avec : des météorologistes, qui étudient les phénomènes physiques atmosphériques et leur implication sur le devenir du temps ; des climatologues, qui analysent la distribution statistique de variables météorologiques, principalement la température et les précipitations d'une région donnée, typiquement sur une période de trente ans (il s'agit-là de la définition classique du climat) ; des scientifiques spécialisés dans l'étude du changement climatique global ; des aéronomes, qui étudient la

[3] En sciences de l'atmosphère, les « sources » sont le lieu de création des espèces atmosphériques. A l'inverse, les « puits » des espèces atmosphériques correspondent aux lieux où ces espèces cessent d'exister (soit parce qu'elles ont été neutralisées *au sein de* l'atmosphère par le biais d'une réaction chimique, soit parce qu'elles ont été captées par la biosphère, les océans, les sols, *etc.*).

haute atmosphère terrestre et les atmosphères d'astres voisins de la Terre (planètes, satellites, comètes) ; ou encore, des océanographes, des écologues, *etc.*[4]

Pour résumer, nous désignons par "chimie atmosphérique", les études sur la composition de l'atmosphère qui possèdent un volet "formalisation des réactions chimiques atmosphériques". La théorie chimique de l'atmosphère se construit à l'intérieur d'un triangle, dont les sommets sont les mesures des composés atmosphériques, la chimie de laboratoire ("appliquée à" l'atmosphère), et les modèles théoriques et numériques. Par "chimie atmosphérique globale", nous désignons l'étude des réactions chimiques ayant une incidence sur la composition de la *stratosphère* et/ou contribuant à la *pollution de fond globale* et au *changement climatique* ou étant affectées par le phénomène de *changement climatique* et/ou participant des *cycles biogéochimiques globaux* (donc de la science dite "du système Terre").

STS et macrohistoire

Dans quelle tradition de recherche en SHS ce mémoire s'inscrit-il ? Il ne s'agit pas pour nous de faire ici une "histoire internaliste", de faire par exemple un travail d'analyse épistémologique sur « la compréhension scientifique » de la chimie atmosphérique globale, comme l'a fait Maureen Christie au sujet de la science de la couche d'ozone [Christie, 2000, p. 1]. Notre travail de thèse de doctorat en « Sciences, techniques, savoirs – histoire et société », réalisé pour l'École des hautes études en sciences sociales (EHESS) au sein du Centre Alexandre Koyré (Paris), s'est donné pour tâche de faire, certes, une *histoire longue,* mais pas au sens d'une histoire des idées ou des concepts : une histoire longue "*sociale*" d'un champ d'étude scientifique. Un tel projet ne va pas de soi. Les historiens qui ont fait leur ce projet ont donné naissance à des récits de natures très diverses.

Le noyau dur théorique de notre travail est l'approche constructiviste ; et, puisque nous avons pour objet une communauté scientifique, nous revendiquons l'héritage de la tradition constructiviste de SHS sur les sciences et les techniques, les STS.[5] Les thématiques

---

[4] En France, par exemple, la plus grande institution de recherche sur « l'environnement global » a été créée en 1995 par l'un des tout premiers spécialistes français de la destruction anthropique de l'ozone, Gérard Mégie (il occupera plus tard la présidence du CNRS, entre 2000 et 2004). L'IPSL (Institut Pierre-Simon Laplace) regroupe six laboratoires franciliens au service d'« une stratégie commune pour l'étude du « Système Terre » dans sa globalité ainsi que pour l'étude d'autres objets du Système solaire », est-il énoncé sur son site Internet. L'institut accueille de nombreux spécialistes de la chimie de l'atmosphère terrestre, en particulier au sein des quatre laboratoires suivants : le LATMOS (Laboratoire Atmosphères, Milieux, Observations spatiales), qui comprend notamment une équipe de recherche sur les « Stratosphère, Haute Troposphère et leurs Interfaces » (SHTI) et une autre sur les « Transport, Aérosols, Chimie dans la Troposphère » (TACT) ; le LISA (Laboratoire Inter-universitaire des Systèmes Atmosphériques) ; le LMD (Laboratoire de météorologie dynamique) ; le LSCE (Laboratoire des Sciences du Climat et de l'Environnement) [*IPSL*, 2014].

[5] Les STS sont, d'abord, "filles" des "*Cultural / Postcolonial / Gender / … Studies*" –, qui se sont institutionnalisées à partir des années 1960 (les auteurs d'une *Introduction aux* Cultural Studies, Armand Mattelart et Erik Neveu, font débuter « le printemps des *Cultural Studies* » en 1964, avec la création du 'Centre for Contemporary Cultural Studies' à l'Université de Birmingham [Mattelart & Neveu, 2008 (2003), p. 27]). *Cultural, …, Science (& Technology) Studies*

et objets d'étude des STS sont autant de remises en question de certains présupposés qui reviennent presque inévitablement dans tout discours. Les STS traitent la distinction science / politique (et le Grand partage Nature / culture de la Modernité) comme une frontière qui fluctue en fonction de la communauté et des acteurs qui la tracent ; les STS pensent les politiques de recherche et d'innovation comme des formes de coopération ou de résistance aux politiques dominantes (le plus souvent, aux politiques libérales) ; elles décrivent les controverses scientifiques et sociotechniques comme des constructions dynamiques de collectifs (d'experts, d'industriels, de citoyens, de décideurs politiques, *etc.*) ; elles questionnent le sens et l'usage des catégories macrosociales et des grands récits (« société postindustrielle », « société postfordiste », « société du risque », « modernité réflexive », « modernité liquide », Anthropocène, *etc.*), qui véhiculent des valeurs qu'il faut analyser ; elles mettent en perspective différentes approches « participatives » (les politiques de participation sont diverses, et correspondent à des formes diverses de mobilisation et d'appropriation du pouvoir) ; elles mettent en lumière le rôle joué par « l'amateur » ou le « profane », dans l'élaboration de nouveaux savoirs. [Bonneuil & Joly, 2013]

La tradition des STS, qui s'est imposée dans le champ académique au cours des années 1990, est jalonnée de reconfigurations et de diversifications. Nous ne pouvons en rendre compte ici.[6] Nous mettrons l'accent sur un seul point. Les auteurs STS insistent généralement sur le caractère inter- ou trans-disciplinaire de leurs études, qui combinent sociologie des sciences, relations internationales, anthropologie, histoire, *etc.* Mais, ils s'attèlent souvent, plus particulièrement, à étudier une production (très) locale des savoirs, en réalisant des travaux anthropologiques ou en analysant en détail une controverse sociotechnique à l'aide d'une analyse dite "symétrique" des pratiques des acteurs. Il est indéniable que la sociologie des sciences et la « micro-histoire » des sciences ont métamorphosé notre manière de nous

partagent une matrice « constructiviste » : les savoirs, les valeurs et les identités sont des constructions ; ces constructions correspondent à des configurations sociales et discursives particulières.

Dans leur ouvrage *Sciences, techniques et société*, Christophe Bonneuil et Pierre-Benoît Joly décrivent le cœur du projet STS comme suit :

> « Comment rendre compte des liens inextricables à travers l'histoire entre ce que l'on sait du monde, ce que l'on souhaite y faire et la façon dont on le gouverne ? Les théories et approches dominantes de l'économie, de la sociologie, de l'histoire ou de la science politique ont souvent ignoré ou mal saisi ces enchevêtrements complexes de social, de nature, de technique, de savoir et de pouvoir. C'est autour de l'étude de ces liens de codétermination entre façons de savoir et formes de pouvoir, et de façon souvent transdisciplinaire (histoire, sociologie, philosophie, anthropologie, science politique…), que s'est constitué un nouveau domaine de recherche, le champ « Science, technologie et société » (STS). »
> [Bonneuil & Joly, 2013, p. 4]

[6] Le lecteur trouvera de nombreux articles et ouvrages historiographiques de qualité sur le sujet. Pour des histoires des STS et des analyses des débats qu'elles soulèvent, nous renvoyons à Hess, 1997, Pestre, 2006, Lamy, 2007, Bonneuil & Joly, 2013, ou encore à la troisième et dernière édition de *The Handbook of Science and Technology Studies* (Hackett *et al.*, 2007) (quatrième édition à paraître, en 2015).

représenter les pratiques scientifiques. Toutefois, les limites de ces approches ont également été soulignées.

Peter Galison, à qui l'on doit des histoires longues de la microphysique (Galison, 1997) et de l'objectivité (Daston & Galison, 2007), s'est ainsi demandé « ce qu'un microhistorien ne voyait *pas*. » Il a rappelé qu'il existait de nombreuses formes de « non localité ». « La microhistoire est supposée être une exemplification, une exposition ('a display') à travers le détail *particulier* de quelque chose de *général*, quelque chose qui est plus que soi-même », écrit Galison. Or, les études microhistoriques fournissent rarement des éléments de représentation « générale » de la « culture scientifique » (l'émergence du « Baconianisme », par exemple), et sont même souvent inaptes à décrire les spécificités d'un champ d'étude scientifique particulier. Des aspects de la pratique scientifique ne se laissent tout simplement pas réduire au local. « Scrutez de manière trop proche des particularités et vous ne comprendrez pas la création des langages scientifiques ; ils ne s'élèvent pas du crâne d'un chercheur unique [, isolé]. Examinez un laboratoire particulier avec un grossissement trop important et vous ne verrez pas la construction des manières d'être un scientifique – la persona scientifique, changeante au cours du temps, n'est pas l'invention d'un individu. (Par exemple : un scientifique est-il plutôt comparable à un industriel, à un sage, à un devin, à un artiste, ou à un entrepreneur ?). » Ces « rôles plus larges, normatifs » (le « soi du scientifique ('scientific self') ») et des pratiques scientifiques macrosociales durables sont occultés par les analyses microhistoriques, de même que la compréhension de l'usage de types particuliers de rhétorique par les acteurs scientifiques.[7] [Galison, 2009, pp. 119-122]

Une autre remise en question de la microhistoire a été effectuée par des auteurs se réclamant plus volontiers des STS que ne le fait P. Galison. Ces auteurs ont reproché aux sociologues des sciences et aux microhistoriens, qui dominaient le champ des STS, de décrire les rapports sociaux et politiques de manière trop "horizontale", en occultant largement la "verticalité" du pouvoir, c'est-à-dire les rapports de force entre des acteurs aux capitaux financiers, symboliques, *etc.* extrêmement contrastés (pouvoir d'une multinationale face à de petites entreprises, des artisans, des agriculteurs, *etc.* ; pouvoir d'un Etat sur de plus petites entités administratives ; puissance diplomatique des Etats ; pouvoir d'un personnage médiatique, d'un Prix Nobel *vs* celui d'un quidam ; *etc.*)… Parmi ces auteurs,

[7] Pour illustrer son propos, P. Galison prend l'exemple de la météorologie :
"[T]o understand the weather, you cannot simply take measurements day by day or hour by hour in front of your castle (as every minor European princeling did for many years). The relevant scale for meteorological prediction is larger. You, with your thermometer, your castle keep, and your notebook alone, will *never* guess the existence – much less the dynamics – of cold fronts and warm fronts. Similarly, in many instances in the history of science, it is not enough to know how this or that bit of technique got taken up in a particular laboratory or moved from one lab to another. The large-scale synchronization of laboratories made possible a host of new disciplines, from the examination of migratory bird patterns to the mapping of the sky, from modern geology to cosmic-ray physics." [Galison, 2009, p. 121]

Dominique Pestre, qui a introduit la notion de « régime de production des connaissances ».[8] Cette notion de « régime », écrivent C. Bonneuil et P.-B. Joly, « présente l'intérêt de prendre en compte une multiplicité de *modes* de production des savoirs au niveau mésoscopique […], tout en appréhendant les relations (synergie, opposition, rapports de pouvoirs…) qu'ils entretiennent les uns avec les autres, au sein d'un agencement de niveau supérieur, macroscopique, propre à une période historique, dans un ou plusieurs pays. » [Pestre, 2003 & 2006 ; Bonneuil & Joly, 2013, pp. 21-29]

Une autre raison pour laquelle nous avons privilégié une histoire longue (et macrosociale) est plus "propre à notre objet", la chimie atmosphérique globale, qui est une composante de l'environnement global. Les travaux d'histoire environnementale globale, que l'on doit tout autant à la « haute vulgarisation » de Jared Diamond qu'à une histoire plus académique (Alfred Crosby, William McNeill, Mike Davis, Kenneth Pomeranz, *etc.*), ont explosé depuis le tournant des années 1990.[9] Or, cet environnement-là, l'environnement global, possède ses caractéristiques propres, qui rendent précieuse une approche macrohistorique. D'abord, l'environnement à grande échelle et global diffère des autres par le fait que certaines de ses dynamiques, y compris celles liées à l'impact de l'homme, se produisent sur de longues temporalités. De tels cadrages spatiaux et temporels sont coextensifs à ceux de « l'histoire globale » (de Fernand Braudel, des tenants de la 'World history', *etc.*). Ils posent des

[8] Dominique Pestre a voulu prendre le contre-pied, à la fois de l'éclatement des STS en micro-études de cas, et du grand récit – erroné – d'un basculement dans les années 1970 d'un « mode 1 » de production des connaissances (« connaissances produites dans un contexte gouverné par les intérêts d'une communauté académique autonome ») à un « mode 2 » (« production de connaissances dans les contextes d'application ») de Gibbons *et al.*, 1994. D. Pestre a certes proposé, lui aussi, l'apparition d'une discontinuité radicale dans les années 1970. Mais, d'une autre nature : le passage d'un « régime de production des connaissances » à un autre, depuis un « régime 1870-1970 », où la science est, entre autres choses, un acteur central de la « redéfinition de ce qu'est l'Etat, un élargissement fantastique de son être » dans ce qu'on appelle communément l'État providence, vers un « régime post-1970 », où les sciences font écho « au passage à un régime libéral à dominante financière », à des reconfigurations dans le corps social national (en particulier, « la croyance au progrès continu et naturellement positif est érodée », « le bien supérieur du collectif incarné par les grands commis de l'Etat tend à se raréfier devant l'attraction du "marché" », la rationalité de la science et de l'action publique sont contestées »), *etc.* [Pestre, 2003].

Cette notion de « régime de production des savoirs / des connaissances » avait déjà été utilisée, notamment par Simon Schaffer en 1994 ("regime of knowledge production"), dans une réponse à une lecture critique de son article "Self evidence" par Rothfield (1992) [Schaffer, 1994].

[9] Comme l'ont rappelé Fabien Locher et Grégory Quenet dans leur article historiographique « l'histoire environnementale : origines, enjeux et perspectives d'un nouveau chantier », le caractère transnational de l'environnement global a encouragé une multiplication et une diversification des nationalités des travaux de SHS sur le sujet depuis les années 1990, ainsi que de travaux comparatistes entre nations (dans un contexte où les échanges de travaux entre régions du monde ont été "mécaniquement" stimulés et accélérés par Internet, et par la mobilité croissante des chercheurs). La montée en puissance politique du changement climatique, en particulier, a beaucoup contribué à stimuler le champ d'étude de SHS sur l'environnement global ; et, la diplomatie du changement climatique, aux multiples facettes, a généré un grand nombre de travaux de SHS à travers le monde. De manière générale, écrivent F. Locher et G. Quenet, l'explosion de l'histoire environnementale globale a largement contribué à faire des « interactions société-environnement » l'un des phénomènes historiques les plus important du XX^{ème} siècle. « C'est toute la vision de l'histoire qui en est changée ». Sous la plume de certains historiens, « la pollution atmosphérique tue plus que les deux guerres mondiales ; Churchill ou Guillaume II s'effacent derrière Thomas Midgley, l'inventeur de l'essence au plomb et du premier gaz CFC ». [Locher & Quenet, 2009, pp. 22-34]

questions de "compétitions" civilisationnelles : antagonismes entre une civilisation industrielle fossile et d'autres modèles ; formes de domination des pays occidentaux, avant et après la décolonisation ; *etc.*

Ensuite, les problèmes politiques que posent les articulations entre les différentes échelles spatiales et temporelles des politiques de l'environnement global sont nombreuses.[10] En particulier, il convient d'expliquer les implications de l'hégémonie scientifique et/ou de la proactivité diplomatique de certains pays en faveur de la "protection de l'environnemental global", ainsi que les résistances qu'elles génèrent dans les autres pays. Différentes focales sont nécessaires pour appréhender de telles problématiques. Bien que concentrée presque exclusivement sur l'arène scientifique, notre étude ouvre des portes vers plusieurs chantiers tout aussi importants que celui-ci entrepris ici. Toutefois, nous avons jugé qu'il était plus logique de commencer par mener ce travail historique transnational et sur le long terme, que personne n'a encore initié en propre au sujet de la chimie atmosphérique globale, plutôt que nous jeter dans une microhistoire qui serait aveugle aux grandes dynamiques d'évolution des questions politiques et scientifiques relatives à ce champ. Réaliser une histoire sociale et politique longue nous est en outre apparu plus à notre goût et plus formateur.

Enfin, notre récit s'inscrit dans une histoire sociale et politique (longue) des pollutions de l'air et de l'atmosphère, et en particulier des pollutions urbaines. Jusque dans les années 1970, décennie pourtant marquée par la promulgation des premières normes de qualité de l'air par l''US Environmental Protection Agency' (EPA ; 1970-…), ces atteintes à l'environnement ont été largement négligées par les auteurs de SHS [Melosi, 1979 ; Quenet & Locher, 2009]. Par contre, elles ont fait partie des « nouveaux objets » qui ont émergé dans le champ de l'histoire environnementale dans la deuxième moitié des années 1980, aux côtés de la pêche et de la disparition des ressources en poisson, des conséquences de l'expansion des banlieues, ou encore du rapport à l'environnement scruté au prisme du genre. L'histoire des pollutions atmosphériques a depuis fréquemment été couplée à une histoire environnementale de l'industrie et de l'énergie, qui vise généralement à produire des contre-récits de l'histoire progressiste de la « Révolution industrielle » qui prévaut… Et, par là, cherche à ébranler « le récit historique 'mainstream' de l'économie sur les relations énergie / développement, qui célèbre l'augmentation de la consommation d'énergie par individu au cours des deux derniers siècles (*i.e.* la Croissance économique moderne) », pour reprendre les

[10] Stefan Aykut en identifie de nombreuses dans son mémoire de thèse de doctorat, intitulé *Comment gouverner un 'nouveau risque mondial' ? La construction du changement climatique comme problème public à l'échelle globale, européenne, en France et en Allemagne* (Aykut, 2012).

mots de l'historienne de l'économie Stefania Barca [Locher & Quenet, 2009, p. 11 ; Barca, 2011, p. 1309].[11]

L'un des premiers travaux d'ampleur faisant une histoire scientifique, politique et sociale des pollutions de l'air a été consacré à l'agglomération londonienne, foyer d'épisodiques smogs soufrés spectaculaires, depuis la décennie 1870 jusqu'à la décennie 1960. Publié en 1987 sous le titre *The Big Smoke. A History of Air Pollution in London Since Medieval Times*, il est à mettre à l'actif d'un chimiste de la troposphère, Peter Brimblecombe (Brimblecombe, 1987). A la même époque, plusieurs sociologues s'attellent à l'étude de politiques des pollutions de l'air. En France, Philippe Roqueplo confronte les discours des acteurs de la controverse qui a fait rage en Europe au sujet des pluies acides. Son travail est publié en 1988 sous le titre *Pluies acides : menaces pour l'Europe* [Roqueplo, 1988]. Quatre ans plus tard, on retrouve P. Roqueplo parmi les auteurs de l'ouvrage collectif *La Terre outragée. Les experts sont formels !*, livre important qui définit, si l'on peut dire, un nouvel agenda de travail sur l'environnement pour la communauté de SHS française [Theys & Kalaora (Dir.), 1992].

Pour résumer, malgré la percée de la microhistoire depuis les années 1990, l'histoire des sciences, les STS et l'histoire environnementale ont conservé en leur sein une tradition de macrohistoire, dans laquelle nous nous inscrivons. Nous nous sommes appuyé, d'une part, sur des travaux relatifs à l'apport de la NASA dans la science de l'ozone (Lambright, 2005 ; Conway, 2008), ainsi que sur des travaux de sciences politiques sur la construction de la problématique de l'ozone (même s'ils portent principalement sur la période 1985-1990 ; Haas, 1992(b) ; Litfin, 1994 ; Grundmann, 2006). D'autre part, de nombreux travaux de SHS existent au sujet de la construction de la problématique climatique sur le long terme.

Par contre, peu nombreuses pour l'instant sont les études qui ont souligné l'apport des chimistes dans l'expertise du GIEC ou dans la science du système Terre. Nous le faisons. Nous replaçons en outre l'atmosphère globale comme objet environnemental global rendu chimiquement instable par l'homme (ou comme en « déséquilibre chimique », ainsi qu'ont pu l'écrire certains scientifiques) dans des contextes de production des représentations de l'environnement global. Les avis des scientifiques au sujet d'hypothèses sur la réactivité

[11] Aux Etats-Unis, écrit S. Barca, l'une des premières pierres d'angle des « réflexions de l'histoire environnementale sur la Révolution industrielle » a été posée par Ted Steinberg dans son essai historiographique "An ecological perspective on the origins of industrialization", publié dans *Environmental History Review* (Steinberg, 1986). Au même moment, en Europe, les Français Jean-Claude Debeir, Jean-Paul Deléage et Daniel Hémery publiaient *Les servitudes de la puissance. Une histoire de l'énergie* (Debeir *et al.*, 1986), où les modifications de l'usage énergétique étaient discutées dans une perspective très longue remontant à l'Antiquité, parfois dans une optique mondiale, parfois sur des controverses plus franco-françaises (en particulier, le nucléaire civil). Au Royaume-Uni, B.W. Clapp répondra en 1994 par *Une histoire environnementale de la Grande-Bretagne depuis la Révolution industrielle* (Clapp, 1994). [Barca, 2011, pp. 1311-1314]

chimique de l'atmosphère et sur le caractère instable de l'environnement global sont indissociables de la production de données, de mutations des pratiques de modélisation de l'atmosphère, de la formalisation de l'environnement comme "système" ou "unité cybernétique", de récits sur la "fragilité" de la Terre et sur la "crise écologique", *etc.*

Enfin, notre histoire longue permet de mettre en évidence des jeux d'alliance et des oppositions qui se manifestent dans différents contextes d'expertise – entre un groupe d'experts scientifique dominant, des scientifiques extérieurs à ce groupe, des industriels, des pouvoirs publics, des environnementalistes, *etc.*, entre technophiles et technosceptiques, entre scientifiques de la nature et économistes, *etc.* Etudier différentes expertises et politiques des pollutions de l'air dans une perspective longue permet notamment de mettre le doigt sur des inerties des corps politiques, sociaux, médiatiques, d'identifier les mimétismes et les dépendances au sentier, ou encore d'opposer des valeurs propres à différents champs disciplinaires qui doivent pourtant coopérer de manière circonstancielle. Nous questionnons, en particulier, l'apparent paradoxe entre, d'un côté, une expertise et une gouvernance internationales de la couche d'ozone aujourd'hui présentées par la plupart des acteurs (monde politique, scientifiques, mouvements environnementaux, industrie) comme « un succès », et d'un autre côté, le régime du changement climatique, pourtant très largement inspiré du régime de l'ozone, dans lequel les objectifs de réduction de GES demandés par le GIEC sont incompatibles avec les prises de position politiques.

Notre thèse se présente donc comme un compromis entre histoire sociale longue d'un champ scientifique, et histoire de la construction d'expertises sur les pollutions atmosphériques globales. Dans les sections suivantes, nous détaillons les choix méthodologiques que nous avons faits pour chacune des trois Parties qui composent notre thèse.

Partie A : Le nouveau globalisme des sciences de l'environnement physico-chimique de la Guerre froide

Dans le numéro spécial de la *Revue d'histoire moderne et contemporaine* consacré à l'« Histoire de l'environnement » (2009) qu'introduisent F. Locher et G. Quenet, précédemment cités, l'historien états-unien Ronald E. Doel propose une réflexion critique sur l'histoire environnementale, resserrée sur l'histoire des sciences de l'environnement, et en particulier sur l'histoire des sciences de l'environnement global, champ dans lequel nous inscrivons plus précisément la Première partie de notre thèse. L'historiographie de R. Doel se présente comme un plaidoyer en faveur de l'histoire des « sciences de l'environnement physique », auxquelles il souhaiterait voir accordée une plus grande place au sein de l'histoire

environnementale.[12] En effet, argue-t-il, ces sciences ont été largement négligées par l'histoire environnementale au profit de l'écologie, qui a été et demeure « une source d'inspiration majeure pour de nombreux recueils, en particulier ceux qui ont été écrits à l'intention du public nord-américain ». [Doel, 2009, p. 138]

Ceci, pour deux raisons. Premièrement, parce que, dans la seconde moitié du XX^{ème} siècle, la protection de l'environnement naturel contre les pollutions chimiques est devenue une préoccupation publique majeure principalement sous l'impulsion d'écologues-biologistes. Or, leur action a conduit à des décisions législatives et institutionnelles déterminantes, comme l''U.S. National Environmental Protection Act', le 'Clean Water Act', et le 'Endangered Species Act'. Deuxièmement, parce que les écologues, en particulier les théoriciens des écosystèmes comme Eugene Odum et de « la biologie océanographique » comme G. Carleton Ray (c'est-à-dire appartenant à des « disciplines à qui nous donnons le nom de sciences de l'environnement biologique »), ont été les plus présents dans les luttes pour la protection de l'environnement, aux côtés notamment des « historiens de l'environnement ».[13] Aux États-Unis, poursuit R. Doel, « les historiens de l'environnement partagent avec les écologues et les naturalistes une même méfiance envers les approches des physiciens (méfiance renforcée par le sentiment que ces derniers ont été associés à la guerre du Vietnam) et une sympathie profonde à l'égard des perspectives holistes. » Critiquant les approches simplificatrices des physiciens, le doyen des écologistes nord-américains Eugene Odum « déclare en 1977 que « dépasser le réductionnisme pour le holisme est désormais un impératif, si science et société veulent s'accorder en vue d'un bénéfice commun, stopper la détérioration des écosystèmes ». » [Doel, 2009, pp. 137-140]

Depuis une quinzaine d'années, un récit alternatif s'est fait une place au sein de l'histoire environnementale : non, « l'association entre l'histoire environnementale et l'écologie, et plus généralement les sciences biologiques – dans les États-Unis d'après-guerre et ailleurs – [n'est pas] une nécessité intrinsèque [mais] une construction historique » ; oui, « l'exploration des sciences de l'environnement physique est […] susceptible de permettre l'expansion et le

[12] Voir également l'ouvrage collectif *The historiography of contemporary science, technology, and medicine: writing recent science,* co-édité par Ronald Doel (Doel & Söderqvist (Ed.), 2006).

[13] Dans leur article intitulé « De la nature à la biosphère. L'invention politique de l'environnement global, 1945-1972 », Mahrane Yannick, Marianna Fenzi, Céline Pessis et Christophe Bonneuil ont, quant à eux, principalement attribué « l'alerte planétaire lancée sur l'environnement dès l'immédiat après-guerre » – dont ils font l'un des quatre évènements qui marquent « l'invention politique de l'environnement global » – à trois biologistes-écologues : l'écologue et ornithologue William Vogt ; le naturaliste Fairfield Osborn Jr (qui annonce dès 1948 que l'homme est devenu « une force géologique », constat que réitéreront un demi-siècle plus tard les théoriciens de l'« Anthropocène » tels que Paul Crutzen) ; le biologiste, et premier directeur de l'UNESCO et fondateur de l'ONG WWF ('World Wildlife Fund'), Julian Huxley. Dans le même mouvement, précisent les auteurs, les deux Etats-uniens et le Britannique ont créé, incarné et légitimé la figure nouvelle de « l'expert global ». [Mahrane *et al.*, 2012, pp. 128-130]

renforcement de l'histoire environnementale actuelle ». De nouvelles interrogations surgissent alors : quelles hypothèses et préoccupations ont guidé les acteurs qui ont placé les aspects physiques de l'environnement au cœur de leurs études environnementales au cours des décennies 1940-60 ?; qui étaient les commanditaires de ces études ?; quelles dynamiques théoriques, instrumentales et institutionnelles ont-elles générées ? [Doel, 2009, p. 140] Ces questions esquissent un programme de recherche pour les historiens, auquel R. Doel a lui-même activement contribué [Doel, 2003 ; Doel & Harper, 2006]. Aux côtés d'autres historiens, qui pour certains l'avaient précédé dans cette tâche (*cf.* Forman, 1987 ; Needell, 2000 ; Schweber, 2000) ou rejoint au début des années 2000 (en 2003, *Social Studies of Science* consacrait un numéro spécial "Earth Sciences in the Cold War" (Vol. 33, n° 5)), R. Doel a tracé des sillons d'une histoire "plus physicienne" de la construction scientifique d'un nouvel environnement global après-guerre… Une histoire qui se révèle être, dans le même temps, "plus belligérante".

Alors que « la publication de *Silent Spring* de Rachel Carson en 1962 […] s'inscrit dans un récit [des sciences environnementales largement emprunté à la biologie et l'écologie […] portant sur les dommages causés aux écosystèmes par les industries chimiques modernes » (même s'il entre alors en résonance avec les inquiétudes plus anciennes de l'opinion publique sur les retombées radioactives », liées quant à elles à la physique nucléaire et à la météorologie), écrivent F. Locher et G. Quenet, les récits de R. Doel et ses acolytes montrent que c'est en fait une autre définition de l'environnement, physique celle-là, qui est devenue hégémonique dans les années 1950-60. Hégémonique parmi les scientifiques d'élite des Etats-Unis, mais aussi chez les militaires américains et dans les plus hautes sphères du gouvernement américain (avec pour corollaire la dissimulation de nombreux travaux derrière le « secret défense »). De fait, écrit R. Doel, par contraste avec la plupart des "écosystémiciens" ou des spécialistes d'écologie marine, « les spécialistes de l'environnement physique – dont la carrière avait été façonnée par la Seconde Guerre mondiale et l'élaboration de la stratégie de la guerre froide – considéraient en général la défense nationale comme leur préoccupation majeure » (et fréquentaient pour certains les élites politiques fédérales et les hauts dignitaires de l'armée). La tendance est particulièrement marquée du côté des scientifiques de l'atmosphère.

En 1966, Donald Hornig, un ancien chimiste de l'université de Brown devenu le conseiller pour la science du président Lyndon B. Johnson, pouvait ainsi déclarer que les « sciences environnementales » étaient le terrain de « l'aéronomie, la géologie, la sismologie, l'hydrologie, la météorologie, l'océanographie et la cartographie ». Les sciences biologiques n'apparaissent pas dans la liste [Doel, 2009, pp. 158-162 ; Doel & Harper, 2006, p. 73]. Or, cette hégémonie a survécu à la Guerre froide. En 1992, l'aide fédérale américaine pour les

sciences de l'environnement biologique équivalait à 900 millions de dollars, alors qu'elle s'élevait à environ 3 milliards pour les sciences de l'environnement physique [*NRC Committee on Environmental Research*, 1993, "Research to Protect, Restore, and Manage the Environment, Washington, D.C., National Academies Press" **in** Doel, 2009, p. 163]. Première conséquence : il apparaît comme indispensable de prendre en compte l'héritage institutionnel et épistémologique des années 1940-60 pour décrire les sciences de l'environnement physique des décennies suivantes. Second corollaire : il convient de se demander quelles ont été les nouvelles dynamiques centrales des sciences de l'environnement physique global au cours des décennies suivantes ; et, en particulier, puisque notre travail porte sur la chimie atmosphérique globale, quelles ont été les caractéristiques des sciences physico-chimiques de l'atmosphère à grande échelle post-1970, par contraste avec celles des décennies dominées par les programmes militaires.

Au cours de notre travail, nous avons dialogué avec les travaux sur les décennies 1950-60 ou 1950-70 dont nous venons de donner un aperçu. Nous avons par ailleurs trouvé notre grain à moudre dans des études qui interrogent plus spécifiquement le « tournant environnemental(iste) » des sciences de l'atmosphère dans les années 1970-80. De tels travaux existent principalement pour les Etats-Unis (qui est certes le pays qui a indubitablement été le premier moteur des sciences de l'atmosphère globale depuis 1945). Signalons, par exemple, le long article de David M. Hart et David G. Victor sur « les élites scientifiques dans la fabrication de la politique états-unienne de recherche sur le changement climatique entre 1957 et 1974 » (Hart & Victor, 1993), la thèse de doctorat de Joshua Howe portant sur « la fabrication d'un réchauffement climatique vert : le changement climatique et l'environnementalisme américain entre 1957 et 1992 » (Howe, 2010), les travaux de Chunglin Kwa sur « la montée et la chute de la modification du temps » aux Etats-Unis (Kwa, 2001), ou encore de Matthias Dörries sur « « l'hiver nucléaire » et le changement climatique » (Dörries, 2011).

Quelques travaux de référence couvrent désormais l'évolution des sciences de l'environnement physique dans une perspective longue allant au-delà des années "~1940-1972". Il s'agit, d'abord, de travaux qui ont suivi l'évolution des programmes de recherche dans des institutions particulières. Ainsi, le volume de l'historien Erik Conway sur « la science atmosphérique à la NASA » depuis ses débuts en 1958 (Conway, 2008), l'ouvrage collectif sur le Service d'Aéronomie français (1958-2008) à l'initiative des acteurs scientifiques eux-mêmes (Chanin (Dir.), 2008), ou l'article historique sur l''International Ozone Commission (IO3C)' par l'un de ses membres, Rumen Bojkov (Bojkov, 2010). Pour l'instant, rares sont les travaux sur les sciences de l'atmosphère qui ont fait le grand écart entre 1945 et

les années 2000. Quelques exceptions, toutefois. Par exemple, le travail de James Fleming sur la modification intentionnelle du temps et du climat (Fleming, 2010), l'ouvrage de Joshua Howe, *Behind the curve. Science and the politics of global warming*, qui prolonge le récit de Howe, 2010 jusqu'à notre époque (Howe, 2014), ou l'ouvrage de Paul Edwards, publié en 2010 sous le titre *A Vast Machine. Computer Models, Climate Data, and the Politics of Global Warming*. Là encore, ces études, œuvres d'auteurs états-uniens, sont focalisées sur la communauté scientifique de leur pays.

Nous nous attarderons pour l'heure sur le travail de P. Edwards, qui discute la notion de *globalisme*. L'expression « grande machine ('vast machine') », éponyme de l'ouvrage publié en 2010 par P. Edwards, a été inspirée à l'historien par une citation du célèbre critique d'art britannique John Ruskin, datée de 1839, dont l'historien a fait l'épigraphe de son livre :

> "The meteorologist is impotent if alone; his observations are useless; for they are made upon a point, while the speculations to be derived from them must be on space. […] The Meteorological Society, therefore, has been formed not for a city, nor for a kingdom, but for the world. It wishes to be the central point, the moving power, of a vast machine, and it feels that unless it can be this, it must be powerless; if it cannot do all it can do nothing. It desires to have at its command, at stated periods, perfect systems of methodical and simultaneous observations; it wishes its influence and its power to be omnipresent over the globe so that it may be able to know, at any given instant, the state of the atmosphere on every point on its surface." [Ruskin John, 1839 **in** Edwards, 2010, p. v]

Or, ce dont J. Ruskin rêvait pour la météorologie de son temps a été réalisé – imparfaitement, bien sûr – au XX^{ème} siècle. A partir des années 1960 au moins, cette grande machine, que P. Edwards nomme plus volontiers « infrastructure globale », a en outre été étendue à la science du climat global (et, depuis lors, les deux infrastructures, météorologique et climatique, se recouvrent dans une part importante). C'est cette infrastructure du climat global que P. Edwards décrit dans *A Vast machine*, « ce système sociotechnique qui collecte des données, modélise des processus physiques, teste des théories, et au bout du compte génère une compréhension largement partagée du climat et du changement climatique ». [Edwards, 2010, p. 8]

« Où est la politique dans tout ça ? Partout », répond P. Edwards. « La Guerre froide, la décolonisation, et d'autres aspects de la politique internationale et mondiale ont donné forme aux méthodes et pratiques de collecte de données, en particulier les systèmes par satellite. […] Ce système de production de connaissances délivre, non seulement des

caractéristiques au sujet du passé et d'un avenir probable du climat de la Terre, mais également l'idée-même que le climat planétaire est quelque chose qui peut être observé, compris, affecté par les déchets humains, débattu politiquement, auquel peut s'intéresser le grand public, et peut potentiellement être contrôlé par des interventions délibérées comme la reforestation, [voire] par des "parasols" géants en orbite [qui seraient placés] autour de la Terre. » Au bout du compte, cette infrastructure de connaissances est la raison pour laquelle nous pouvons « penser global » au sujet du changement climatique. En outre, construire des systèmes d'observation globaux requiert la création d'organisations nationales mais aussi intergouvernementales, telles que l'OMM (Organisation météorologique mondiale) ou le GIEC. [Edwards, 2010, pp. xviii & 7-8]

Comme le travail de Paul Edwards mais avec nos acteurs spécifiques, la Partie A de notre thèse est centrée sur les scientifiques ou scientifiques-experts de la recherche publique qui ont participé à la double entreprise de création d'un « globalisme infrastructurel » : « fabriquer des données globales, c'est-à-dire "des données pour agrémenter le globe" ('making global data') », en les compilant le plus largement possible (en créant de nouvelles stations de mesure, avec le personnel associé, dans des lieux épars, dans un maximum d'Etats) ; « fabriquer le caractère mondial (ou « global », « universel ») des données ('making data global') », par le biais de procédés de centralisation des données, de standardisation des appareils de mesures, d'échanges permanents d'information entre scientifiques, et d'échanges entre scientifiques et décideurs politiques, citoyens, *etc.* [Edwards, 2010]. A la construction du 'World Weather Watch' (WWW) par P. Edwards – initié dans les années 1950, stimulé par l'Année géophysique internationale (AGI ; 1957-58), puis officialisé comme organe de l'OMM en 1967 (*Cf.* Edwards, 2006 & 2010) –, répond la construction de "notre" 'Global Atmosphere Watch' (GAW ; 1989-…) de l'OMM, qui est aujourd'hui l'une des infrastructures les plus importantes aux yeux des chimistes de l'atmosphère globale. Le GAW résulte de la fusion du GO3OS (le 'Global Ozone (O_3) Observing System'), créé en 1957, et du BAPMoN ('Background Air Pollution Monitoring Network'), lancé en 1969. Au cours des années 1970-80, ces deux infrastructures avaient pris une nouvelle dimension avec la mise en place de premières gouvernances des CFC, et des SO_2/NO_X, respectivement.

Dernier point. Dans les Parties B et C, nous ne nous focaliserons pas exclusivement sur ce « globalisme infrastructurel ». Nous décrirons également – certes, plus furtivement – d'autres formes de « globalisme », dont la construction incombe moins spécifiquement aux scientifiques. Dans son mémoire de thèse portant sur « la construction du changement climatique comme problème public à l'échelle globale, européenne, en France et en Allemagne », Stefan Aykut a ainsi distingué, en contrepoint du « globalisme infrastructurel » edwardien, un « « globalisme normatif » des sciences politiques » et un « globalisme

« psycho-social » de l'économie politique et de l'étude des relations internationales »… auquel il faut ajouter quelque « préoccupation commune de l'humanité » pour l'environnement [Aykut, 2012, pp. 65-91].[14] Notre analyse, polarisée sur les chimistes de l'atmosphère, décrira principalement les formes de globalismes inhérents à la construction de la science de la couche d'ozone et de l'expertise sur sa destruction – et, plus marginalement, les globalismes inhérents au changement climatique, aux pluies acides et à la qualité de l'air.

Partie B : "Tournant environnementaliste" et "tournant expert" de la science de l'ozone stratosphérique

Dans la Partie A, qui concerne la période 1900-1970, nous décrivons une communauté scientifique qui conçoit la couche d'ozone comme se trouvant en équilibre chimique. Mais, en 1971 et 1974, deux alertes sont lancées par des chimistes, au sujet de risques que présenteraient les avions supersoniques et les CFC issus de l'industrie chimique ('sprays' aérosols, fluides pour les réfrigérateurs et les climatiseurs, *etc.*) pour la couche d'ozone. Le cadre de travail des scientifiques sur l'ozone tranchera désormais avec celui des premières décennies de la Guerre froide. Il s'agira de gérer des problèmes qualifiés de « risques environnementaux » ou de « risques écologiques », et liés à des technologies civiles (flotte d'avions de ligne supersoniques, CFC à usage domestique). Les savoirs sur la chimie atmosphérique globale pénètreront dans les arènes politiques et médiatiques. Pour les scientifiques de l'atmosphère, les années 1970 riment avec la "montée en puissance de la thématique des pollutions", avec la Détente qui fait apparaître comme trop coûteuses les sciences publiques qui avaient prospéré au sein du complexe militaire-industriel-universitaire, ou encore avec des difficultés économiques liées aux crises pétrolières.

Notre Partie B décrit la métamorphose de la chimie atmosphérique globale vers une science d'expertise pour la protection environnementale, dans les années 1970. Elle se présente comme une étude de controverse autour des expertises sur la destruction anthropique de l'ozone aux Etats-Unis. Elle est centrée sur les acteurs scientifiques

[14] Sur la construction de différentes formes de « globalités » dans le cas du changement climatique, nous renvoyons à Aykut, 2012. Pour une introduction à différentes conceptions de la globalisation en SHS, nous renvoyons à Aykut, 2012, « Chapitre 2. Gouverner le réchauffement global : la co-construction d'un problème et de son échelle de traitement ».

Clark Miller a quant à lui proposé une distinction, entre une « globalisation matérielle », commune dans la littérature de Relations Internationales, qui s'attache avant tout à décrire la construction de réseaux générant et gérant des flux matériel, et une globalisation comme « cadrage particulier de caractéristiques particulières de la nature et de la société, en tant qu'il est sensible à l'enquête, aux mesures, à l'analyse, et à une réponse uniquement sur une base mondiale ('solely on a worldwide basis'). [… Ce] globalisme, écrit C. Miller en 2004, est un produit créatif de l'imagination humaine, discipliné par des techniques, des facultés, des outils, des écoles de pensée, des institutions et des pratiques, mobilisés pour produire du savoir ». [Miller, 2004(b), p. 82]

(Harold Johnston, M. Molina, S. Rowland, Richard Scorer, James Lovelock). Notre intention n'est pas de réfléchir à l'expertise sur un plan normatif (voir, sur ce point, Collins & Evans, 2002, Delmas, 2011, *etc.*). Nous décrirons le cadre social dans lequel s'inscrivent les scientifiques auteurs de théories scientifiques et de l'expertise officielle de référence sur la destruction anthropique de l'ozone. Et, nous proposerons, en contrepoint, une typologie de leurs détracteurs.

Depuis les années 2000, rappellent P.-B. Joly et C. Bonneuil dans *Sciences, techniques et société*, « différents chercheurs contribuent au renouvellement des approches comparatives » sur les « épistémologies publiques » (par le biais de comparaisons entre pays, notamment). L'une des perspectives adoptées consiste à décrire des « différences durables dans les formes de production et de validation des connaissances à finalité politique (c'est-à-dire l'expertise). » Différentes composantes de la construction de la crédibilité des connaissances dans les sociétés démocratiques méritent d'être explorés : « des styles de raisonnement, des modes d'argumentation, des standards de preuve, des registres d'objectivité, des normes définissant ce qu'est une « bonne » expertise (Miller, 2008) » [Bonneuil & Joly, 2012, pp. 72-73]. Ces analyses se trouvent au cœur de notre Partie B (ainsi que de notre Partie C).

Notre étude de la controverse sur la destruction de l'ozone dans les années 1970 fait en outre apparaître des oppositions et des alliances disciplinaires. Les tensions entre champs disciplinaires, ou entre « cultures épistémiques »,[15] sont particulièrement visibles au moment de controverses. Nous nous sommes focalisé sur « l'arène scientifique », et en particulier sur la « production » d'expertises. Nous empruntons cette notion d'« arène » à la sociologie des problèmes publics. Le Tableau 1 ci-dessous donne quelques caractéristiques archétypiques des différentes arènes :

[15] Christophe Bonneuil utilise ce concept de « culture épistémique » (*"epistemic culture"*) dans son analyse de controverse entre chercheurs OGM en France entre 1996 et 2003, dans laquelle il décrit l'engagement public des chercheurs et les conflits entre « cultures épistémiques ». Cette notion a été introduite par l'anthropologue et sociologue des sciences Karin Knorr-Cetina. Elle « prolonge celle de paradigme [kuhnien] dans sa volonté de tenir ensemble les dimensions cognitives (théories et modes de raisonnement), techniques (problèmes jugés pertinents et dispositifs empiriques) et sociales de l'activité scientifique (Knorr-Cetina, 1999). Il convient donc, ajoute Christophe Bonneuil, d'abandonner […] une vision des sciences comme monde unifié partageant une même façon de connaître » [Bonneuil, 2006, pp. 257-258 & 264]. Nous souscrivons bien sûr à cette vision générale. Toutefois, les oppositions que nous mettons en relief riment souvent avec des différences de formations disciplinaires, ou avec l'appartenance des chercheurs à des champs d'étude bien identifiés. Aussi, parlerons-nous de conflits et d'associations disciplinaires, plutôt que d'inscription des chercheurs dans des cultures épistémiques.

Arène	Espace d'expression	Ressource	Référent symbolique	Déviations	Acteurs	Production
Economique	Marché	Argent Réputation	Efficacité Echange	Domination	Producteurs Consommateurs	Produits Emplois
Scientifique	Institutions de recherche Académies Comités d'experts	Preuve scientifique Méthodologie Prestige	Vérité Rationalité Rigueur Impartialité	Falsification Manque d'indépendance	Scientifiques Experts Profanes	Connaissances Expertise
Réglementaire	Agences Administration	Règles, codes Procédures	Contrôle Indépendance	Corruption	Contrôleurs Producteurs	Règlements Normes
Législative	Tribunaux	Textes juridiques	Justice	Partialité Erreur judiciaire	Législateurs Juges	Jurisprudence
Politique	Parlements Rue	Pouvoir Confiance	Démocratie	Autisme Prise d'intérêts	Citoyens Hommes politiques	Politiques publiques Lois
Médiatique	Journaux, TV, radio	Audiences Sources	Information objective Liberté d'expression	Censure Mensonge	Journalistes Auditeurs	Emotion Attention Scandales

Tableau 1 : Les arènes publiques
[Bonneuil, 2012, communication personnelle]

Lors des controverses, ne se manifestent pas uniquement des oppositions entre champs disciplinaires, mais également entre conceptions de ce que doit être une expertise juste et efficace. Nous verrons que le météorologiste R. Scorer appelle à un sursaut démocratique, alors que le géochimiste J. Lovelock défend clairement une vision technocratique de la gestion des pollutions. De manière plus générale, les clivages observés lors des controverses sur l'environnement sont autant de manifestations d'idéologies politiques, de la confiance accordée par les acteurs à de grands récits d'évolution de l'environnement global, et de jugements sur les capacités des décideurs politiques à gérer efficacement et durablement les volumes de pollution.

Dans les années 1970, l'attitude affichée, "institutionnalisée" des gouvernements nationaux occidentaux de reprendre la main sur les pollutions atmosphériques coïncide avec des contestations croissantes inhérentes aux fortes hausses des pollutions industrielles au cours des "Trente glorieuses", mais aussi avec un contexte de fort ralentissement de l'activité économique et de délocalisations d'activités industrielles. La conjonction des crises économique et environnementale avive un "nouveau" clivage disciplinaire : celui entre des physiciens et chimistes spécialisés dans l'étude de l'atmosphère, préoccupés par la croissance continue des pollutions atmosphériques, et "les économistes dominants". Les premiers accusent les seconds de légitimer la faiblesse de l'action des gouvernements en matière de pollution. Certains, rares, scientifiques de l'atmosphère rejoignent dans leur lutte des économistes "aux vues alternatives" (les membres du Club de Rome, par exemple), et surtout

des biologistes-écologues (dont les auteurs de *Nous n'avons qu'une terre* (Ward & Dubos, 1974 (1972))). Nous nous attardons longuement sur le "cas Scorer". La critique du météorologiste anglais sur l'empressement des pouvoirs publics à réglementer les CFC aux Etats-Unis et en Scandinavie se prolonge en effet sur une critique de la civilisation fossile et de la confiscation technocratique des problématiques de pollution. Notre récit rencontre alors deux thèmes chers à l'histoire environnementale, qui sont indissociables : l'histoire de la civilisation fossile ; l'histoire sociale et politique sur le long terme des pollutions de l'atmosphère, et en particulier des pollutions urbaines.

La capacité des économies libérales à réguler de manière continue, durable, les pollutions atmosphériques, ou plus généralement les pollutions anthropiques, a été interrogée par de nombreux auteurs. De fait, les systèmes économiques dominants depuis le XIX^{ème} siècle n'ont pas placé la limitation des pollutions parmi leurs premières priorités. Aussi, écrivent Soraya Boudia et Nathalie Jas, il ne faut pas s'étonner d'observer des crises sanitaires et environnementales « récurrentes sur le long terme ». Les pollutions atmosphériques, en particulier, n'ont-elles pas presque toujours été limitées à hauteur de ce que pouvaient offrir les « meilleures technologies disponibles », ou simplement été délocalisées (par le déménagement des activités industrielles et par la construction de hautes cheminées d'usine, en alléguant que les pollutions atmosphériques "se dispersaient" puis étaient lessivées par les précipitations) ? Face à de telles politiques, la contestation est souvent passée par un travail de négociation autour des normes techniques. On observe également la persistance d'autres modes de lutte contre les pollutions : procès juridiques ; mouvements radicaux qui attirent l'attention sur des dangers qui sont parfois masqués par les systèmes fondés sur l'expertise et la réglementation (en particulier, sur des détériorations environnementales sur le moyen et long terme). [Fressoz, 2012 ; Boudia & Jas, 2007, p. 324]

La grande majorité des pollutions atmosphériques sont liées à la combustion de matériaux fossiles. C'est particulièrement vrai depuis la Première révolution industrielle. L'énergie fossile est aujourd'hui devenue le poumon de toutes les économies à travers le monde. Les combustions fossiles ne sont pas seulement les principales génératrices de GES. La mauvaise qualité de l'air leur incombe en très grande partie : la pollution au SO_2 est liée dans une part importante à la combustion de charbon ; l'ozone troposphérique compte parmi ses précurseurs des résidus de combustions fossiles (dont les composés organiques volatiles (COV), qui sont émis par tous les procédés de production et d'utilisation d'hydrocarbures, l'un des principaux émetteurs de COV étant le raffinage de pétrole) ; *etc.*

Les principales substances destructrices d'ozone stratosphérique sont également des hydrocarbures, c'est-à-dire des composés organiques constitués d'atomes d'hydrogène H et de carbone C, qui sont produits par l'industrie chimique à partir de résidus de la combustion

fossile (pétrole, charbon, gaz). Il s'agit, plus précisément d'hydrocarbures halogénés, ou halocarbures, des molécules qui contiennent au moins un atome de la famille des halogènes (clore, fluor, brome, iode) : les chlorofluorocarbures, ou CFC ; les halons comme le CF_3Br (halon 1301) ou le CF_2BrCl (halon 1211). Quant aux substituts des CFC engendrés par le Protocole de Montréal, les hydrochlorofluorocarbures HCFC, les hydrofluorocarbures HFC et autres perfluorocarbures PFC, ils sont eux aussi des hydrocarbures. Comme les CFC, ils sont, de plus, de puissants GES (d'où les politiques menées aujourd'hui pour les remplacer).

Après plusieurs décennies au cours desquelles les pollutions atmosphériques d'origine fossile ont explosé à l'échelle globale, nous proposons de redonner une voix à plusieurs formes de mises en garde formulées par des scientifiques de l'atmosphère dans les années 1970… Des mises en garde plutôt marginales, comme nous le verrons, au cours d'une décennie qui verra naître de premières politiques de recherche ambitieuses au sujet de la couche d'ozone, du changement climatique et des pluies acides.

Partie C : Les chimistes de l'atmosphère dans la production de technologies de gouvernement pour des politiques internationales des pollutions

Notre Partie C porte sur les années 1980 et les décennies postérieures. Tout d'abord, les années 2000 ont été marquées par le constat "d'échec" de la gouvernance internationale du changement climatique, qui avait pourtant été largement inspirée de la gouvernance "à succès" de l'ozone. D'où, l'occasion pour nous de réinterroger le cadrage de l'ozone et la pertinence de cette « dépendance au sentier » entre ozone et climat qu'a vivement attaquée Reiner Grundmann [Grundmann, 2006], ainsi que de nous demander quelles solutions les experts chimistes de l'atmosphère proposent pour sortir de l'ornière climatique. Ensuite, la chimie atmosphérique a intégré les rapports du GIEC. Changement climatique, ozone stratosphérique et pollution de l'air de fond à l'échelle globale se trouvent désormais associés épistémologiquement dans ces grands textes de référence. D'où la nécessité de regarder quels acteurs ont encouragé ce programme, et de nous questionner sur les implications politiques de l'utilisation de ces nouveaux savoirs qui brouillent les frontières entre problématiques de pollutions atmosphériques. En d'autres termes, notre suivi des chimistes de l'atmosphère nous permet de jeter un coup de projecteur sur de nouveaux possibles de gouvernance du changement climatique, ainsi que sur de nouveaux types d'expertise des pollutions ayant émergé au cours des deux dernières décennies.

Les GES de courte durée de vie se positionnent au centre du jeu. L'entrée de la chimie troposphérique dans les rapports du GIEC a poussé sur le devant de la scène politique des

composés autres que le CO_2 : l'ozone, qui est un GES puissant ; des gaz qui participent à la chimie de l'ozone (le monoxyde de carbone, les COV, les NO_x) ; le méthane, qui est également un GES puissant (et participe en outre à la chimie de l'ozone). Certains chimistes de l'atmosphère influents tels que S. Solomon (Solomon *et al.*, 2013) mettent aujourd'hui l'accent sur la nécessité de réglementer les gaz à effet de serre de courte ou moyenne durée de vie tels que l'ozone et le méthane, ou encore le carbone suie, qui pourrait lui aussi contribuer à réchauffer l'atmosphère. Ils incitent à mener des gouvernances des pollutions "multi-polluant et multi-effet". Ils mettent l'accent sur les possibilités de réaliser par ce biais des « co-bénéfices ». Par exemple, baisser les émissions de précurseurs de l'ozone troposphérique serait bénéfique, à la fois pour le climat et pour la qualité de l'air, dans la mesure où l'ozone est à la fois un GES puissant et un polluant urbain toxique. Certains auteurs de SHS défendent également cette option, arguant que le cadrage de la gouvernance climatique est mauvais. C'est le cas par exemple des signataires du *Hartwell Paper: A New Direction for Climate Policy after the Crash of 2009*, dont R. Grundmann compte parmi les signataires [Prins *et al.*, 2010]. Nous discutons les raisons et les implications politiques qui sous-tendent cette tendance à promouvoir les réductions des GES de courte durée de vie, et à encourager les politiques à « co-bénéfices ».

Dans notre Partie C, nous empruntons de nouvelles thématiques aux STS. D'abord, dans une perspective de recherche « transnationale et comparatiste » sur l'expertise, nous nous intéressons aux « régimes de régulation internationaux et à la constitution d'une expertise globale » sur l'ozone, le changement climatique et le système Terre. Comme le formulent C. Bonneuil et P.-B. Joly, « le caractère de « bien global » ne s'impose pas naturellement et requiert un travail des acteurs, qui mobilise souvent des images, quantifications ou modélisations scientifiques » [Bonneuil & Joly, 2012, pp. 74-75]. Ainsi en va-t-il des images environnementales globales telles que l'image du trou de la couche d'ozone [Grevsmuehl, 2012], ou de la construction du seuil maximal « +2°C » qui s'est imposé dans les arènes politiques du changement climatique [Aykut & Dahan, 2011].

Ensuite, nous réalisons un travail inhérent à « la circulation de standards ou instruments de gouvernement d'un espace politique à l'autre » (entre EPA et industriels, entre institutions nationales et supranationales, entre pays). Trois standards communs conditionnent typiquement « l'évolution de la régulation des risques en Europe et aux Etats-Unis depuis les années 1980, rappellent C. Bonneuil et P.-B. Joly : les standards d'analyse des risques, les analyses coûts/bénéfices et les dispositifs de participation du public » [Bonneuil & Joly, 2012, pp. 73-74]. Dans ce travail, nous nous focalisons principalement sur des « standards d'analyse des risques » particuliers : des « indices environnementaux

('environmental indicators') » (*cf.* Leeuw, 2002). Nous rencontrerons des « indices » (Indice UV), des « potentiels » ('Ozone Depletion Potential' (ODP) et 'Global Warming Potential' (GWP)), des « charges critiques »… Ces indicateurs, élaborés par les experts scientifiques de l'environnement sont des « métriques », qui créent un lien, des plus évidents, entre des scientifiques aux savoirs complexes et une sphère politique en demande de quantificateurs pour guider et légitimer son action.[16]

Qu'en est-il, en particulier, des gouvernements de la couche d'ozone et du changement climatique ? A partir de la fin des années 1970, dans le cadre de la genèse d'une expertise interntionale sur la destruction anthropique de l'ozone et des premières négociations internationales sur des réglementations des CFC, des liens se sont créés entre des scientifiques de la nature et des acteurs "profanes", qui ont milité conjointement en faveur de réglementations sur les CFC (Peter Haas a parlé de la constitution d'une « communauté épistémique écologique » de l'ozone [Haas, 1992 (2)]). Les chimistes de l'atmosphère globale s'immiscent alors dans l'arène réglementaire, notamment par le biais de la production d'un indice environnemental particulier, l'ODP (développé au début des années 1980 par D. Wuebbles, du 'Lawrence Livermore National Laboratory' (LLNL), à la demande de l'EPA). Nous montrons que l'ODP a joué un rôle décisif de médiation entre les décideurs politiques et l'industrie, et entre les négociateurs nationaux… Un rôle que le GWP, calqué sur l'ODP, peine à endosser dans le cadre de la gouvernance climatique, malgré sa promotion, toujours renouvelée, de la part des experts du GIEC.

[16] Les experts du rapport officieux *Nous n'avons qu'une terre*, publié en marge de l'UNCHE de Stockholm, l'avaient parfaitement compris. Ils avaient consacré leur « Chapitre II » aux « unités de la science ». A l'aide de grandeurs quantifiables, ils escomptaient interpeler les humains au sujet des multiples impacts néfastes de leurs activités, sur différentes échelles de temps : en mettant en évidence des contradictions entre « matière » et consommation d'émission (et politiques natalistes, et croissance économique), en calculant les « prix » importants de la pollution (coûts "cachés" dans les "externalités"), en promouvant des « normes de qualité » environnementales. [Ward & Dubos, 1974 (1972), pp. 77-271]

Partie A. *1900-1970*. Le paradigme d'une couche d'ozone en équilibre

"Thank God, man cannot as yet fly, and lay waste the sky as well as the earth!"
H.D. Thoreau, 1861

Les premiers pas de *la chimie atmosphérique globale* concernent des réactions chimiques dans la partie supérieure de l'atmosphère, et en particulier la chimie de *l'ozone stratosphérique*. Entre 1929, date de la proposition par Sydney Chapman d'un premier schème de destruction / production d'ozone stratosphérique, et 1970, date de la première alerte à la destruction anthropique de la couche d'ozone, la théorie chimique de l'ozone stratosphérique est l'apanage de physiciens et mathématiciens de formation (des géophysiciens, des astronomes, des météorologistes), et s'étoffe peu. La stratosphère est traitée principalement comme *une entité géologique en équilibre dynamique et chimique*.

Si les décennies 1900-60 ne feront guère rimer "environnement" atmosphérique avec "protection environnementale", elles n'en seront pas moins une période d'intense transformation sociale, matérielle et épistémologique pour les sciences de l'atmosphère. L'atmosphère à moyenne et grande échelle, en particulier, recèle de multiples défis scientifiques :

- comme un lieu de théorisation de phénomènes spectaculaires (éclairs, aurores boréales, nuages), que l'on cherche à modéliser avec les nouveaux savoirs et les nouveaux instruments ;
- comme une "gène" pour l'observation de l'espace ;
- comme un milieu dangereux pour les nouvelles technologies aéronautiques et aérospatiales, ou encore un milieu à connaître pour pouvoir y déployer des ondes de télécommunications fonctionnelles.

La composition de la moyenne et la haute atmosphère, voire les réactions chimiques qui s'y produisent, gagnent en importance aux yeux des météorologistes, des géophysiciens et des astronomes.

En ce qui concerne la stratosphère en particulier, non seulement elle serait le lieu de transformations chimiques (dans sa couche d'ozone), mais les sciences des années 1940-60 indiquent que son climat et sa météorologie pourraient en outre subir des variations rapides, en lien avec l'activité de volcans ou d'écosystèmes (comme les microorganismes des sols, qui émettent dans l'atmosphère du protoxyde d'azote N_2O), ou comme résultantes d'essais nucléaires atmosphériques. Toutefois, dans les années 1940-60, les publications sur la stratosphère demeurent presque toujours cantonnées dans l'arène scientifique. Les médias ne s'intéressent guère à ces résultats. Ils ne relaieront guère non plus les quelques rares hypothèses scientifiques sur l'éventualité d'une destruction de l'ozone par des composés chimiques anthropiques (avions supersoniques, navettes spatiales) formulées dans les années 1960. Quant aux travaux sur les impacts des essais nucléaires atmosphériques sur la stratosphère, soit ils ne sont – pour la plupart – pas rendus publics, soit ils indiquent que les impacts sur l'environnement, et en particulier le climat, seraient insignifiants au-delà de quelques jours ou semaines [Dörries, 2011, p. 204].

La presse se fera en revanche – certes, très épisodiquement – l'écho d'allocutions de scientifiques au sujet des changements climatiques à grande échelle et globaux. Ainsi, au lendemain de la conférence de H. Ahlmann donnée le 29 mai 1947 devant ses pairs de l'Institut de géophysique de l'Université de Californie à Los Angeles, le *New York Times* rapporta l'inquiétude de ce professeur de géographie de l'Université de Stockholm devant l'« énorme » augmentation des températures arctiques qu'il avait constatée au cours des dernières décennies (Ahlmann avait même avancé le chiffre de +5°C), ainsi que sa suggestion de créer urgemment une agence internationale pour étudier les conditions climatiques à l'échelle globale [Hill Gladwin, 1974, "Warming arctic climate melting glaciers faster, raising ocean level, scientist says", *New York Times*, 30 mai 1947, p. 23 **in** Doel, 2009, p. 142]. Quelques années plus tard, l'AGI ayant généré entre temps de nouvelles données, un reporter du même quotidien écrira que les niveaux de CO_2 augmentaient à cause « de la décharge constante de fumées par les cheminées d'usine, les pots d'échappement des automobiles, les moteurs d'avions à réaction, les feux de forêts, et la combustion des tas d'ordures » [Sullivan Walter, 1961, "Air Found Gaining Carbon Dioxide", *The New York Times*, 11 September 1961, 29 **in** Hart & Victor, 1993, p. 651]. Certaines figures de l'élite des sciences de l'environnement physique états-unienne étaient déjà sur le pont depuis plusieurs années ; toutefois, les historiens David Hart et David Victor ont montré que « malgré son importance scientifique et la facilité avec laquelle on lui avait trouvé des financements dans le cadre de l'Année Géophysique Internationale (AGI ; 1957-58) », le programme de surveillance du CO_2 peinait encore à trouver des financements au début des années 1960 [Hart & Victor, 1993, p. 651].

Il existe une littérature abondante sur l'expertise et la gouvernance de l'ozone après 1970 (voir nos Parties B et C), une littérature importante sur les sciences des années 1940-60 – en particulier sur les mutations décisives de la météorologie et de la science du climat global (Edwards, 2004 & 2010 ; Dörries, 2006 ; Doel, 2003 & 2009 ; Hart & Victor, 1993 ; Howe, 2014) –, et par ailleurs des histoires de la météorologie du XIX^{ème} siècle et de la première moitié du XX^{ème} siècle.[17] En revanche, les histoires "pré-belligérante" (avant 1940) et "pré-médiatique" (avant 1970) *de l'ozone* comme objet d'étude d'une atmosphère "à grande échelle" ou "globale" pour les astronomes, géophysiciens et météorologistes, n'a inspiré aucun travail spécifique de SHS. Dans cette Partie A, nous posons quelques pierres afin de combler en partie ce déficit. En outre, le cadrage initial de la question scientifique de l'ozone stratosphérique, que nous détaillons dans cette partie, est, pour notre lecteur, un prérequis à la compréhension des débats scientifiques sur l'ozone tels qu'ils se poseront à partir de 1970.[18] Enfin, cette étude des décennies 1900-60 nous permet de spécifier, par la négation, l'originalité des pratiques et des valeurs des chimistes de l'atmosphère globale après 1970.

"Pré-médiatique" ne signifie pas "pré-politique". Il existe toujours, pour commencer, des *enjeux de politique de recherche*. Par exemple, Gordon Dobson cherche à imposer son spectrophotomètre comme instrument de référence des mesures d'ozone. Il doit pour cela convaincre son laboratoire d'Oxford et la Royal Society de le financer, et ses pairs européens de prendre part à son programme de mesure. Ensuite, les épistémologies, particulières à chaque époque, résonnent avec *la manière qu'ont les scientifiques d'approcher l'objet "environnement"*. Ainsi, S. Chapman attribue à la Nature globale une immuabilité, qui lui interdit de croire en une destruction significative et donc dangereuse de la couche d'ozone… alors pourtant qu'il propose lui-même dans le même temps une expérience d'ingénierie devant supprimer – très localement et très provisoirement – l'ozone atmosphérique, afin d'obtenir de meilleures observations du ciel [Chapman, 1934]. Enfin, dans les années 1940-60, les enjeux politiques de l'aéronomie sont patents dans ses *applications militaires*.

Notre Partie A suit quatre axes principaux :

---

[17] Nebeker, 1995, *Calculating the Weather. Meteorology in the 20th Century* constitue une bonne entrée dans les questions d'épistémologie et de disciplines météorologiques du XX^{ème} siècle. Pour une approche plus "entre science et société" sur la météorologie des Etats-Unis aux XIX^{ème} et XX^{ème} siècles, nous renvoyons aux travaux de James Fleming et de ses collaborateurs, que l'on trouve notamment dans le journal à comité de lecture *History of Meteorology* de l'*International Commission on History of Meteorology* (voir : http://www.meteohistory.org). Au sujet de la science de la prévision du temps en France au XIX^{ème} siècle, nous renvoyons à Locher, 2008.

[18] Dans l'optique de définir efficacement la problématique scientifique pour un public non-spécialiste des sciences de l'atmosphère, nous avons inséré dans cette partie quelques incises et notes techniques, et même occasionnellement anticipé sur le contexte scientifique et les controverses scientifiques sur l'ozone postérieurs à 1970 – anticipations bien sûr problématiques aux yeux de l'historien, mais parfois nécessaires à la clarté d'un long récit comme le nôtre.

1. Elle montre que la première chimie atmosphérique globale, la chimie de l'ozone stratosphérique, s'inscrit pleinement, dès ses débuts, au sein d'une *tradition d'études de l'atmosphère*, et nullement au sein de la discipline chimie. De surcroît, ces études sont, à de rares exceptions près, la chasse gardée de *physiciens* de formation : météorologistes, géophysiciens, astronomes-aéronomes.
2. Elle retrace *la création de réseaux de mesure d'ozone* à l'échelle internationale. Elle donne également quelques entrées au sujet des autres premiers réseaux de mesure internationaux des composés atmosphériques, qui contribuent à la genèse de nouveaux modèles de la circulation atmosphérique globale – dite "circulation générale". Parmi les vocations de ces réseaux, on trouve les premières entreprises de traçabilité de polluants anthropiques à grande échelle (particules radioactives émis lors des essais nucléaires atmosphériques, précurseurs des pluies acides).
3. Elle décrit *la construction d'une culture et d'une épistémologie particulière*, qui rendra possible les alertes à la destruction anthropique des années 1970.
4. Elle souligne *l'inscription des aéronomes et de météorologistes au sein du complexe militaire-industriel-universitaire*. Nous nous attardons particulièrement sur les Etats-Unis, pays qui devient après 1945 la puissance scientifique principale, y compris sur les questions atmosphériques de météorologie à grande échelle, de climat global, voire d'aéronomie.

Le Chapitre 1 décrit les débuts de la chimie de la stratosphère – qui ne sont autres que les débuts de la chimie atmosphérique de manière générale. Les Chapitres 2 et 3 offrent un complément au tableau, déjà esquissé par de plusieurs historiens, sur le nouveau régime des sciences qui naît dans les années 1940-1960 aux Etats-Unis, en URSS et en Europe occidentale. Parmi les sciences qui sont alors largement irriguées par des financements militaires, la recherche atmosphérique figure en bonne place, voyant ses capitaux croître à une vitesse inédite. C'est le cas, en particulier, de la science de la stratosphère, sur laquelle nous nous attarderons. Son développement se fait alors par des va-et-vient entre, d'une part, une science finalisée, très compétitive (entre nations) et souvent peu transparente, au service d'enjeux de défense nationaux, et, d'autre part, des collaborations présentées comme "pacifiques", car concernant des questions de sciences plus "fondamentales". En ce qui concerne les programmes nationaux états-uniens, ils sont, en règle générale, pensés dès leur conception comme devant atteindre les deux finalités – Défense et "progrès de la science".

Chapitre 1. *1900-1940*. L'ozone stratosphérique, nouvel objet des géophysiciens et météorologistes

Dans la première moitié du XX^{ème} siècle, la formalisation du devenir des gaz et aérosols dans la basse atmosphère, qui incombe aux météorologistes, fait l'économie de théorisation des interactions chimiques. En ce qui concerne la haute atmosphère, par contre, le géophysicien et astronome britannique Sydney Chapman (1888-1970) élabore un schème théorique de chimie gazeuse pour l'ozone dès 1929. Les scientifiques le considèrent encore aujourd'hui comme la première théorie de chimie moderne rendant compte d'interactions chimiques dans l'atmosphère. Le formalisme de Chapman, baptisé postérieurement « cycle de Chapman », consiste en une succession d'équations-bilans, qui décrivent les réactions chimiques entre différentes molécules oxygénées mesurées dans la moyenne atmosphère – l'oxygène radicalaire O, le dioxygène O_2 et, donc, O_3, l'ozone. Or, il ne s'agit pas d'un ensemble de "réactions *simples*" de type "dilution" (de type $XY \text{-}[+ H_2O] \rightarrow X^+ + Y^-$), ou de "réactions "*physiques*" de type "ionisation" (de type $X \rightarrow a.X^+ + a.e^-$), comme les autres transformations atmosphériques jusqu'alors prises en compte, mais bel et bien d'un groupe de "réactions *chimiques*", c'est-à-dire d'un groupe de "transformations d'une ou de plusieurs espèces chimiques en d'autres espèces chimiques, du fait de l'apparition ou de la disparition d'au moins une liaison chimique ou d'un échange d'électrons" (c'est la définition d'une réaction chimique !; cette réaction sera, par exemple, de type $AB + C \rightarrow AC + B$). L'hypothèse de Chapman est relayée par ses pairs. Pour la première fois, la chimie réactive inventée dans l'air maîtrisé du laboratoire s'exporte dans l'atmosphère. En d'autres termes, *une chimie atmosphérique* – au sens où nous l'entendons dans cette thèse, comme théorie des réactions chimiques dans l'atmosphère – voit le jour. Il s'agit, même, d'une chimie de l'atmosphère *globale*, puisqu'elle porte sur les concentrations moyennes d'ozone d'une couche d'ozone stratosphérique dont les scientifiques jugent qu'elle enveloppe la planète.

Le schème de S. Chapman doit expliquer les résultats des mesures d'ozone en altitude, dont la tradition a débuté dans les années 1880, puis a fait l'objet de travaux systématiques dans la lignée des premières mesures spectroscopiques de Marie Paul Auguste Charles Fabry et Henri Buisson en 1919-20, à l'aide d'un interféromètre. L'hypothèse d'une couche d'ozone est en outre indissociable de la définition d'une couche stratosphérique, à laquelle a contribué de manière décisive un autre Français,

Léon Teisserec de Bort, au cours de la décennie 1900. A ce propos, nous avons fixé arbitrairement le début de notre récit à l'année 1900, qui marque simplement le basculement dans un nouveau siècle, afin de ne pas donner l'illusion qu'un événement plutôt qu'un autre serait plus fondamental, plus décisif. Tous sont importants.

Notre histoire des sciences de l'ozone stratosphérique des décennies 1900-30 ne constituera qu'un unique chapitre de notre thèse, dans la mesure où notre thématique centrale, l'expertise de la chimie de l'atmosphère pour le politique, ne trouve pas d'incarnation importante à cette époque. A cette période, l'étude de l'ozone n'est qu'un micro-champ, qui n'offre qu'une contribution marginale à la météorologie, et dont l'utilité dans la prévision du temps ne saute pas aux yeux. Ce Chapitre 1 ne prétend pas rendre compte de la diversité des recherches sur l'ozone d'alors – bien qu'elles soient peu nombreuses. Nous avons principalement consulté des travaux scientifiques "de référence", laissés par des chercheurs reconnus par leurs contemporains (S. Chapman, Gordon Dobson, Arthur Adel, Daniel Barbier, Daniel Chalonge)… même s'il est parfois difficile de juger si ce ne sont pas tout autant les générations suivantes qui les ont consacrés comme "travaux de référence" (et qui nous ont en outre rendu leurs travaux plus facilement accessibles, plus facilement visibles, à nous qui n'avons pas consacré un travail archivistique approfondi sur les travaux de cette époque). A cette littérature s'ajoute un matériau biographique (une monographie de S. Chapman et une autobiographie de G. Dobson). Or, l'utilisation de ces deux types de texte comporte le risque de dépeindre les figures scientifiques sélectionnées d'une manière héroïsée – à la fois car on leur enfile le costume du pionnier, et parce qu'on nous donne souvent à voir leur expérience propre plutôt que l'expérience collective dans laquelle elle s'inscrit (d'où l'intérêt, justifié dans l'Introduction générale, de ne pas s'en tenir, si possible, à des biographies, mais plutôt de se lancer dans des prosopographies). L'autre risque est de céder à quelque trop-humain tropisme téléologique, en présentant *a posteriori* ces scientifiques, ainsi que leurs travaux, comme les inspirateurs des développements qui suivent.

Nous n'avons pas cherché activement à éviter ces écueils. Ce chapitre n'a pas vocation à apporter une contribution de choix à l'histoire sociale des sciences du début du XX^{ème} siècle, ni même de l'entre deux guerres, mais à retracer quelques chemins *épistémologiques* qui prédominèrent alors, pour mieux les contraster ensuite avec les préoccupations des chercheurs des années 1940-70 (Chapitres 2 et 3) et des années 1970 (Partie B). Nous insisterons néanmoins sur le caractère "socialement construit" des savoirs sur l'ozone et de l'hégémonie de G. Dobson au sommet de la science de l'ozone, jusqu'alors peu documenté. De plus, en croisant nos archives avec une littérature secondaire

sur les sciences météorologiques de la première moitié du XXème siècle, nous proposons à la fin de ce chapitre une cartographie des sciences de l'atmosphère au milieu du XXème siècle, qui complète celle de la littérature historique existante, limitée principalement à la météorologie de la basse atmosphère – c'est le cas, par exemple, de notre ouvrage référent sur le sujet : Nebeker, 1995, *Calculating the Weather. Meteorology in the 20th Century*. Elle prend en effet en compte les travaux des astronomes sur la haute atmosphère (dont celui de Chapman), les études d'aérologie sur les phénomènes météorologiques en altitude (auxquelles Dobson entend contribuer), les travaux de géophysiciens faisant l'hypothèse d'un changement climatique, ou encore les études sur la pollution de l'air.

Trois Sous-chapitres composent ce Chapitre 1. Le premier situe la construction épistémologique de la couche d'ozone dans une tradition d'élaboration d'une géographie verticale de l'atmosphère à l'échelle globale : la définition de "couches atmosphériques". Il fait ensuite un récit de la construction d'instruments de mesure stratosphérique de l'ozone, ainsi que d'un réseau centralisé à Oxford à partir de la deuxième moitié des années 1920, sous l'impulsion d'un G. Dobson prosélyte qui s'installe au sommet de la pyramide de la recherche sur l'ozone.

Le Sous-chapitre 1.2 décrit la genèse du cycle photochimique de l'ozone proposé par S. Chapman en 1929. En outre, nous montrons que les études spectrométriques de l'ozone, relues par Chapman, ont joué un rôle de « zone d'échange » entre plusieurs disciplines (*cf.* Galison, 1997).

Enfin, un dernier sous-chapitre fait état de la fragmentation des sciences de l'atmosphère jusqu'aux années 1940, tout en pointant du doigt les rares échanges entre scientifiques de la basse atmosphère et de la haute atmosphère. Il se conclut sur une proposition de cartographie des sciences de l'atmosphère du début du XXème siècle, qui complète celle de Nebeker, 1995.

1.1. Les premiers réseaux de mesure d'ozone stratosphérique

Identifier le gaz Ozone

Au tournant des années 1940, les concentrations moyennes des trois gaz atmosphériques principaux sont connus (azote, ≈78% du volume d'air atmosphérique total ; dioxygène, ≈21% ; argon, ≈1%). Ceux-ci sont toutefois peu étudiés. Ils ne possèdent pas les propriétés physiques "spectaculaires" de types ionisation ou effet de serre des autres gaz présents dans

l'atmosphère en plus petite quantité : les "gaz traces". Deux de ces gaz traces font l'objet d'une attention particulière, dans la perspective d'une quantification de la composition atmosphérique globale. Le premier est la vapeur d'eau, qui est identifiée comme le principal gaz à effet de serre, et intéresse bien sûr également les prévisionnistes du temps, du fait notamment de sa capacité à se condenser pour créer des nuages. Le second est l'ozone.[20] Des méthodes semblables d'interprétation des spectres (ou bandes) d'absorption des gaz sont utilisées pour la vapeur d'eau et l'ozone (mais, dans l'infrarouge et l'ultraviolet, respectivement) ; cependant, ce dernier est reconnu comme plus facilement quantifiable. [Barbier & Chalonge, 1942]

Au tournant du XX^{ème} siècle, l'ozone est même l'un des gaz atmosphériques traces que l'on sait le mieux identifier. Dans le monde scientifique, coexistent déjà deux traditions d'études de l'ozone, l'une sur l'ozone dans l'air ambiant, l'autre sur l'ozone en altitude. Manuel Vázquez et Arnold Hanslmeier font débuter la première tradition avec le programme de Georg Neumayer (1826-1909) en 1858, au 'Meteorological Observatory' de Melbourne (Australie), financé par le roi Maximilien II de Bavière. Suivent, quelques années plus tard, des mesures systématiques à l'Observatoire de Montsouris en banlieue parisienne. Elles semblent avoir été motivées par le rôle présumé de l'ozone « dans le contrôle des épidémies », écrit Amandine Chevalier dans sa thèse de Physique-chimie de l'atmosphère (qui signale également des mesure d'ozone à la même période au Col du Sencours, en contrebas du Pic du Midi, où est déjà installé l'Observatoire). Mais, la crainte du caractère délétère de l'ozone présent dans l'air ambiant, qui avait motivé ses dernières mesures, s'estompe chez les scientifiques à la fin du XIX^{ème} siècle. Elle fera l'objet de peu de travaux jusque dans les années 1950, où elle resurgira à la faveur des smogs de Los Angeles, phénomènes que les travaux de Haagen-Smit, notamment, attribueront à la formation photochimique d'ozone, gaz jugé responsable de problèmes respiratoires et de dégâts sur la végétation et le caoutchouc.[21] [Vázquez & Hanslmeier, 2006, p. 14 ; Chevalier, 2007, p. 9Bachmann, 2007, p. 660]

---

[20] Au sujet des « constituants de l'atmosphère susceptibles de dosages globaux » autres que la vapeur d'eau et l'ozone, les astronomes Daniel Barbier et Daniel Chalonge se contentent d'écrire, en 1942 : « Les bandes d'absorptions infrarouges du gaz carbonique permettraient l'étude de ce corps. Adel et Lampland ont, d'autre part, signalé récemment la présence, dans l'atmosphère, des oxydes d'azote N_2O_2 et N_2O [;] la quantité totale de N_2O dans l'atmosphère serait équivalente à une couche de plusieurs millimètres de ce gaz pris sous les conditions normales » (*i.e.*, approximativement, dans un air tempéré, à proximité du sol) [Barbier & Chalonge, 1942, p. 55]. L'ouvrage de D. Barbier et D. Chalonge est consacré en priorité à la région *de la Stratosphère à l'Ionosphère*. Leurs auteurs ne sont pas actifs dans le débat sur l'action climatique globale du CO_2. Toutefois, le fait qu'ils ne mentionnent nullement Guy S. Callendar ni les autres protagonistes du débat sur le changement climatique des années 1900-30, témoigne de la marginalité de ce dernier. Une marginalité par ailleurs démontrée par l'historien James Fleming dans son ouvrage consacré à G. Callendar (Fleming, 2007(c)).

[21] Lorsque la thématique de l'ozone délétère redevient un objet de recherche important dans les années 1950, le paradigme qui lie "santé" et "environnement" est bien sûr très différent de celui qui prévalait dans les dernières décennies du XIX^{ème} siècle, qui était encore imprégné de néo-hippocratisme (sur les théories néo-hippocratiques,

Mais, au début du XX^{ème} siècle, l'essentiel de l'intérêt des scientifiques pour l'ozone atmosphérique est concentré sur l'ozone en altitude. Les programmes de recherche qu'il suscite sont menés principalement par des astronomes et des géophysiciens, *physiciens* de formation et habitués à raisonner en termes *globaux*. Leur profil est donc très différents des hygiénistes qui se sont intéressés aux effets délétères de l'ozone dans l'air ambiant et ont plus généralement été préoccupés par les pollutions de l'air, qui sont le plus souvent des météorologistes, des médecins ou des chimistes de formation. Leurs pratiques instrumentales tranchent également, puisque les spécialistes de l'ozone en altitude ont recours principalement à la spectroscopie, là où les spécialistes de l'air ambiant extérieur se basent principalement sur des analyses chimiques des précipitations (qu'ils recoupent avec des expériences dans le laboratoire).[22]

Les définitions disciplinaires des couches atmosphériques

Dès le XVIII^{ème} siècle, une tradition de cartographie de l'atmosphère s'est développée parallèlement à la géographie des territoires "terrestres". A l'aide d'extrapolations, les relevés de température au sol conduisent au dessin de cartes représentant les températures au sol jusqu'à l'échelle hémisphérique, comme c'est le cas des cartes de lignes isothermes d'Alexander von Humboldt (1817). Une autre tradition se développe à la fin du XIX^{ème} siècle. Elle est l'œuvre de météorologistes des pollutions, qui corrèlent par exemple la hauteur des cheminées des industries aux différences de longueur de parcours des polluants, d'après le lieu de retombée de ces derniers (jusqu'à des distances pouvant excéder cent kilomètres). Mais, en règle générale, la géographie de l'atmosphère se veut principalement *horizontale*

---

nous renvoyons par exemple à Fressoz, 2009 & 2012 et à Fressoz & Locher, 2010 – même si ces travaux sont principalement focalisés sur les cas français et anglais des décennies 1780-1840). A la fin du XIX^{ème} siècle, l'une des figures importantes de l'expertise sur les pollutions de l'air est le Britannique Robert Angus Smith, nommé en 1863 premier « inspecteur » chargé de faire respecter l'Alkali Act anglais. Dans son ouvrage majeur *Air and Acid Rain – the Beginnings of Chemical Climatology* (1972), il cherche à établir l'augmentation des concentrations en acide sulfurique à proximité des villes (c'est dans cet ouvrage que l'on trouverait la première occurrence de l'expression "acid rain"), et passe plus généralement en revue ses travaux sur la composition de l'air atmosphérique (même s'il déplore n'avoir pas été en capacité de réaliser les essais qu'il souhaitait au sujet de l'ozone, et ne tire par conséquent pas de conclusion au sujet de ce gaz – il évoque simplement un potentiel effet néfaste de l'ozone, en tant qu'il détruit l'oxygène, gaz bénéfique) [Smith, 1872]. L'historien de la médecine John Eyler a montré que la chimie imprégnait toutes les théories sanitaires que ce disciple de l'illustre chimiste Justus von Liebig (1808-1873) avait élaborées au cours de sa carrière. Et ceci, même après avoir, comme beaucoup d'autres savants de son époque, fait du "biologiste" Pasteur la nouvelle référence centrale de sa théorie hygiéniste (Dans les années 1870, écrit J. Eyler, R.A. Smith chercha à « réconcilier Liebig et Pasteur », en défendant que les microorganismes agissaient comme agents de transfert de l'activité chimique ; et, *Air and Rain*, daté de 1972, est dédié à son ancien professeur J. von Liebig). [Smith, 1872, pp. 13 & v ; Eyler, 1980, pp. 228]

[22] Notons que, dans son ouvrage de 1872, Robert Angus Smith distingue déjà entre ces deux régions de résidence de l'ozone, l'une proche du sol, et l'autre dans la haute atmosphère :

> "The formation of ozone in the upper atmosphere does not give us more oxygen; we obtain only a more active condition of that element. The formation of ozone at the surface, and of nitrous gas also, by evaporation, affect, in conjunction with the elimination of oxygen by organisms, the supply of that [oxygen] which may be removed." [Smith, 1872, p. 12]

Aucune théorie chimique de la formation de l'ozone n'est, en revanche, proposée par R.A. Smith.

jusqu'à la fin du XIX^{ème} siècle (tous les mouvements dans l'atmosphère étant donc ramenés à des phénomènes d'advection), et ceci malgré l'essor des vols en ballon. [Grevsmuehl, 2014 (à paraître), p. 23 ; Jacobson, 2002]

Les premières cartographies *verticales* de l'atmosphère voient le jour au tournant du XX^{ème} siècle. A la faveur des développements de la spectroscopie, une tradition de caractérisation physique et chimique de la moyenne et de la haute atmosphères devient possible. Bientôt, des strates atmosphériques sont discriminées, en fonction de quelques paramètres physico-chimiques (température, pression, humidité, concentration en ozone, charges électriques, *etc.*). On *postule* que ces strates sont globales (en d'autres termes, elles recouvrent la planète dans des gammes d'altitudes où elles conservent des propriétés partout semblables).

La météorologie de la moyenne atmosphère du tournant du XX^{ème} siècle est d'abord tributaire des vols en ballon. Les géographes y retrouvent l'esprit de découverte de territoires nouveaux qui les anime.[23] Mais surtout, les premières mesures de paramètres physiques de la moyenne atmosphère, réalisées par les météorologistes et les chimistes, promettent de nouvelles formalisations des phénomènes météorologiques et climatiques. Les manifestations les plus étudiées sont les vents et les « phénomènes météorologiques insolites » (mirage, foehn, *etc.*), en corrélation notamment avec les inversions très brusques de température que l'on observe à certaines altitudes particulières, accessibles en ballon. Le géographe Maurice Zimmermann met par exemple en exergue les travaux d'un chercheur états-unien, A.L. Rotch, directeur de l'Observatoire de Blue Hill (Massachussetts), qui poursuit « assidument ses études sur la couche d'inversion, c'est-à-dire sur la nappe d'air

[23] Dans la « chronique géographique » des *Annales de Géographie* de 1895 puis de 1909, le géographe français Maurice Zimmermann (1870-1950) fait part de son enthousiasme au sujet des dernières conquêtes de « la haute atmosphère », qui font écho aux conquêtes des régions polaires dont il avait fait sa vocation :

> « Quoique le champ soit encore largement ouvert aux hypothèses et aux théories, on commence à connaître de façon précise la météorologie de la haute atmosphère. [Les mesures thermométriques et barométriques réalisées jusqu'à 16325 mètres lors des] ascensions [des ballons] *Cirrus* et […] *Phoenix*, dirigées par le professeur Assmann et M. Berson, resteront mémorables à cet égard. [… En outre,] les recherches du naturaliste anglais Aitken sur la répartition des poussières dans l'air, l'étude de Nordenskiöld sur leur nature et leur composition, ne semblent pas moins intéressantes. » [Zimmermann, 1895, pp. 380-381]
>
> « L'étude de la haute atmosphère, inaugurées par MM^{rs} TEISSERENC DE BORT, ASSMANN, HERGESELL, ROTCH, se poursuivent et modifient de jour en jour nos conceptions météorologiques. [Aux études au-dessus de l'Europe s'ajoutent celles, toujours des Européens, durant l'été de 1908, au-dessus de la région équatoriale, où l'on identifia, entre le sol et 20000 mètres d'altitude,] pas moins de quatre systèmes de vents superposés […] On atteignit même la zone d'inversion des températures » [(*i.e.* la tropopause – voir corps du texte)], qu'on n'avait pas pu mettre en évidence au-dessus de l'Atlantique. [Zimmermann, 1909, pp. 371-372]

Comme l'a montré Fabien Locher, au cours du XIX^{ème} siècle, l'atmosphère devint, non seulement un enjeu pour l'armée et le commerce (prévoir le temps), mais également elle-même « une nouvelle frontière à conquérir et à explorer » pour des scientifiques et des profanes (à l'aide d'aérostats, d'avions et autres engins balistiques) – comme avaient pu l'être les régions polaires au XVIII^{ème} siècle, par exemple, à la fois régions où mesurer la courbure de la Terre et territoires qui regorgeaient potentiellement de curiosités. [Locher, 2008, pp. 9-12]

relativement chaud qui semble envelopper le globe aux altitudes supérieures à 12 km. Pendant les quatre dernières années, écrit Zimmermann en 1909, il n'a pas lancé moins de 77 ballons à Saint-Louis (Missouri). » [Zimmermann, 1909, pp. 373 & 372]

Des relevés chimiques, dont des mesures d'ozone, sont également effectués, en même temps que les systématiques mesures de température, de pression, de vitesse du vent, d'humidité. Des échantillons chimiques sont recueillis à l'aide de ballons (habités ou non). Dès 1850, au cours de leur deuxième ascension en ballon, les Français Barral et Bixio étaient parvenus à voler plus d'une heure sans encombre et à atteindre une altitude de plus de 7000 mètres, où ils avaient prélevé de l'air et du gaz carbonique (ils avaient embarqué deux ballons métalliques à robinet pour prélever de l'air, et une batterie de tubes à essais dosant l'acide carbonique). Dès les années 1890, des ballons-sondes transportent des appareils enregistreurs au-delà de 10000 mètres, avant que les « stratostats » d'Auguste Piccard ne permettent d'emporter à plus de 20 kilomètres des chercheurs et leur laboratoire, au cours des années 1930. (Plus tard, comme le verront dans les Chapitres 2 et 3, les ballons seront rejoints dans leur conquête de la stratosphère par des avions, au cours de la Seconde Guerre mondiale, puis par des missiles transformés en "fusées météorologiques", après-guerre.) [Locher, 2008, p. 183 ; Barbier & Chalonge, 1942, pp. 38-62]

L'étymologie du mot « stratosphère » (latin *stratus* : « étendu »), choisi en 1909 par Léon Teisserec de Bort dans son ouvrage sur *la Circulation de l'atmosphère,* ne rend pas hommage à ses propriétés thermiques. Ce sont pourtant elles qui avaient fait que le météorologiste français avait plafonné notre air ambiant, devenu "troposphère", autour de dix mille mètres d'altitude. Au-dessus, Bort avait rencontré un air dont la température ne diminuait pas avec l'altitude.[24] Quelques années plus tard, la "stratosphère" sera caractérisée par sa température croissante avec l'altitude (mais certes, presque constante dans sa partie inférieure). Troposphère et stratosphère sont donc définis par leurs *profils de températures* relatifs, opposés (respectivement, décroissant et croissant avec l'altitude).

De nouvelles strates atmosphériques viendront ensuite recouvrir la stratosphère, jusqu'à compartimenter l'atmosphère en cinq couches : la troposphère (où la température

[24] Puisqu'il était parvenu dans une région où il n'observait plus de baisse de la température alors qu'il continuait à s'élever, Bort avait d'abord nommé cette région de l'atmosphère « couche isotherme » (1899). Ces hautes altitudes, Bort les avait conquises de haute lutte. Après sa démission du Bureau Central Météorologique en 1892, il allait s'élever en ballon à maintes reprises à des altitudes dangereuses, mais aussi reproduire inlassablement des mesures automatiques à l'aide de thermomètres placés dans ses ballons inhabités, qui monteront jusqu'à 14 km d'altitude. Des mesures de nuit lui donnèrent la conviction que la stabilisation de la température de l'air au-dessus de 11 km n'était pas un artefact – le réchauffement diurne. En 1904, sa recherche s'appuyait sur les « résultats de 581 ascensions, dont 141 avaient atteint 14 km d'altitude », relate Richard Goody, l'un des premiers spécialistes de la physico-chimie de la moyenne et haute atmosphère et des atmosphères planétaires dans les années 1950. Goody consacrera cette recherche de Bort comme « l'une des plus fines de l'histoire de la météorologie ». [Goody, 1954, pp. 1-5]

diminue avec l'altitude) ; la stratosphère (où la température augmente avec l'altitude) ; la mésosphère (où la température diminue avec l'altitude) ; la thermosphère (où la température augmente avec l'altitude) ; l'exosphère (la région au-delà de la thermosphère, au sein de laquelle les collisions entre particules sont considérées comme négligeables ; les atomes s'y comportent "librement" et peuvent suivre diverses trajectoires, certains s'échappant même de l'atmosphère terrestre ; lorsque l'on monte vers les plus hautes altitudes, la notion habituelle de température cesse d'être pertinente, de même que par ailleurs, assez rapidement, les lois de l'hydrostatique ; et, la pression chute vers le zéro de pression qui caractérise l'espace).[25]

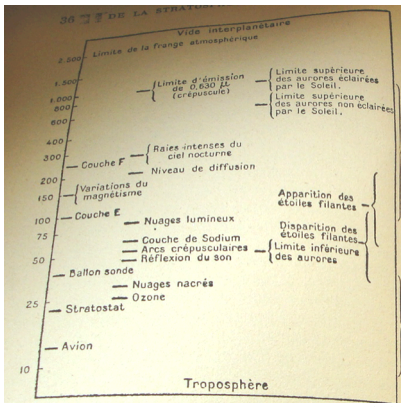
Cette structure de l'atmosphère en "couches" définies par leur profil de température est bien connue de notre grand public scientifiquement éduqué. Mais, le consensus autour de cette division de l'atmosphère (voir Figure 1(b) ci-dessous) date seulement des années 1960, quelques années après que les deux pontes de l'aéronomie d'après-guerre, Sydney Chapman et Marcel Nicolet, eurent intercalé une nouvelle couche entre la stratosphère et la thermosphère, qu'ils avaient nommée mésosphère.[26] En effet, au milieu du XX^{ème} siècle, les critères de définition des couches atmosphériques n'étaient toujours pas arrêtés. On s'était entendus sur les appellations de trois couches : la « troposphère », la « stratosphère » (entre 10 et 15 km – suivant les latitudes –, et 40 km environ) et l'« ionosphère » (au-delà de 100 km) ; mais, « aucun nom spécial [n'était réservé à] l'étendue comprise entre 40 et 100 km », au sujet de laquelle on avait « le moins de renseignements », écrivent en 1942 les astronomes à l'Observatoire de Paris et à l'Institut d'Astrophysique du C.N.R.S., D. Barbier et D. Chalonge. [Barbier & Chalonge, 1942, p. 3]

En outre, la définition de l'ionosphère n'obéit pas à une logique thermique, mais "électrique". « A 100 kilomètres, poursuivent les deux astronomes français, commence *l'ionosphère* caractérisée par le fait que les molécules constituant les gaz de l'air y sont en grand nombre ionisées (ce qui veut dire qu'elles ont perdu un électron) » [Barbier & Chalonge, 1942, p. 3] (voir Figure 1(a) ci-dessous). Jusque dans les années 1950, les chercheurs, physiciens-astronomes de formation pour la plupart, continueront à proposer de nouvelles régions atmosphériques, en invoquant des traditions disciplinaires différentes. Les définitions des couches atmosphériques en matière de *propriétés thermiques*, de *propriétés des gaz* et de

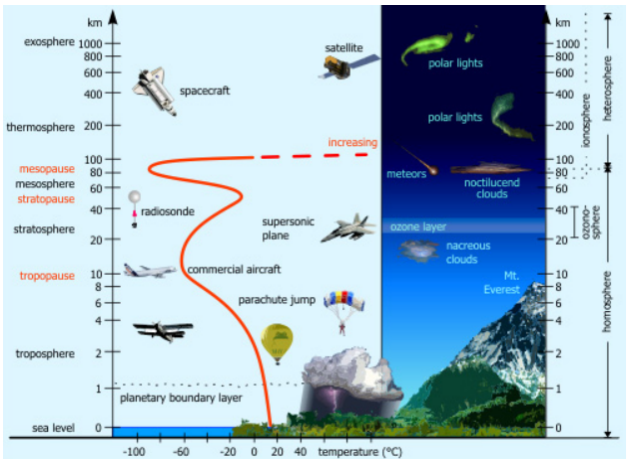
[25] Les atmosphères des planètes voisines de la Terre obéissent au même type de nomenclature. En ce qui concerne Titan, l'un des satellites naturels de Saturne, les tendances des profils de température de sa très haute atmosphère restent très variables aux yeux des scientifiques, si bien que celle-ci ne peut être rigoureusement identifiée comme une couche unique au profil de température caractéristique. Néanmoins, faute de mieux, les scientifiques désignent la partie supérieure de l'atmosphère de Titan, située au-dessus de sa mésosphère (soit, pour Titan, au-dessus de 500 km), par le terme "thermosphère", c'est-à-dire par le même terme que celui utilisé pour le sommet des atmosphères des autres planètes et lunes.

[26] En 1962, le géophysicien canadien Kenneth Hare pouvait encore écrire « qu'il n'existait pas d'accord définitif au sujet de la terminologie […] de la Haute Atmosphère ». [Hare, 1962, pp. 527-528]

propriétés électriques cohabiteront dans les travaux de S. Chapman, Flöhn, Penndorf ou Richard Goody.[27] (Précisons que des couches définies de manière non thermique sont encore utilisées par certaines communautés scientifiques – ainsi, l'ionosphère ; voir Figure 1(b) ci-dessous).

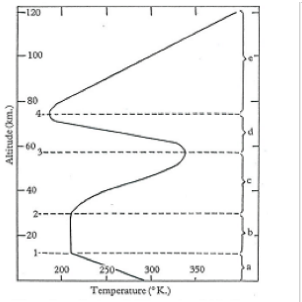


(a)



(b)

Figure 1 : Couches atmosphériques, phénomènes et procédés d'études de la haute atmosphère (a) en 1942 et (b) en 2011 (échelles d'altitudes logarithmiques)
[Barbier & Chalonge, 1942, « Figure 5 », p. 36 ; http://www.theozonehole.com/atmosphere.htm (04/06/2011)]



Reference	This book	Flöhn and Penndorf	Chapman I	Chapman II	Chapman III
a	Troposphere	Advection layer	Troposphere		
1	Tropopause	Tropopause layer	Tropopause		
b	Lower	Isothermal layer	Stratosphere		
2			Stratopause		
c	Upper (Strato-sphere)	Warm layer (Strato-sphere)	Meso-incline (Meso-sphere)	Homo-sphere	Neutro-sphere
3		Ozonopause	Meso-peak (Meso-sphere)		
d		Upper mixing layer	Meso-decline (Meso-sphere)		
4	Stratopause	Upper tropopause	Mesopause	Homopause	Neutropause
e	Ionosphere	Ionosphere	Thermosphere	Heterosphere	Ionosphere

Figure 2 : Cinq nomenclatures atmosphériques, proposées au début des années 1950 par Goody (schéma et colonne de gauche), Flöhn et Penndorf, et Chapman
[Goody, 1954, « Figure 2 : Approximate vertical temperature distribution in the atmosphere in temperate latitudes » & « Table I : Atmospheric nomenclature », pp. 5-6]

Enfin, outre ces couches définies selon des paramètres physiques, une zone verticale de l'atmosphère, souvent nommée « *couche d'ozone* » (dès le début des années 1930 au moins –

[27] Chapman avait proposé à lui seul trois « formes » de « nomenclature » : l'une, en fonction de « propriétés thermiques » (Chapman, I) ; l'autre, de considérations sur la physiques des gaz (la propriété « d'homogénéité » (gazeuse) : « l'atmosphère est supposée entièrement mélangée sous la stratopause ») (Chapman, II), la dernière, en fonction de « propriétés électriques » (Chapman, III). Flöhn et Penndorf, quant à eux, combinaient propriété thermique (température), propriété physique des gaz (homogénéité) et composition chimique (*cf.* « ozonopause »). Enfin, la nomenclature de Richard Goody, qui voulait se limiter, selon ses termes, aux termes « usuels » de l'époque reconnaissables sans même recourir à quelque « définition formelle » et ne « véhiculant rien d'autre que ce que les preuves expérimentales avaient justifié », mêlait des caractéristiques électriques (qui définissent l'ionosphère) et thermiques (pour les autres couches : troposphère et stratosphère) [Goody, 1954, pp. 6-7] (voir Figure 2 dans le corps du texte).

cf. Chapman, 1934) et parfois « ozonosphère », est quant à elle être définie par sa *composition chimique, fortement concentrée en ozone*.[28] Ce ne sont pas des chimistes, mais des astronomes et quelques météorologistes, qui initièrent l'étude de l'ozone stratosphérique au début du XX^{ème} siècle. La raison en est d'abord instrumentale. C'est en effet l'avènement de la télédétection, et en particulier de la spectroscopie, qui permit de mesurer de manière plus précise et plus systématique les concentrations de la colonne d'ozone atmosphérique en différents lieux, et par là de faire de premières estimations des concentrations d'ozone dans la stratosphère (au début du XX^{ème} siècle, les scientifiques sont déjà tombés d'accord sur le fait que la stratosphère soit le principal foyer d'ozone ; en revanche, il faudra attendre les années 1940 pour qu'un consensus se dégage au sujet de l'altitude de la couche d'ozone, d'après des mesures par la méthode dite "Umkehr" – voir note n° 17 du chapitre). Or, la spectroscopie atmosphérique fut développée initialement principalement par les astronomes, afin d'observer la haute atmosphère et l'espace.[29]

Les réseaux matériels et humains de Gordon Dobson

On attribue communément au physicien français Alfred Cornu la découverte d'un "trou" dans le spectre de la lumière solaire au niveau de l'ultraviolet (autour de la longueur d'onde 300 nm) ; le jugeant plus marqué au moment du coucher du soleil, il l'imputera à une absorption de ces longueurs d'onde par l'atmosphère (car une plus grande épaisseur d'atmosphère est traversée lorsque le soleil est bas). Un an plus tard, soit en 1880, l'Irlandais Walter Noel Hartley adjuge cette coupure spectrale dans l'UV (à 293 nm) à la présence d'ozone dans l'atmosphère (sur la base d'études du spectre de l'ozone en laboratoire). Les mesures d'ozone par spectrométrie offrent alors un nouveau programme de recherche sur l'atmosphère.

---

[28] Même si, là encore, comme nous le verrons, cet ozone stratosphérique est corrélé au profil de température de la stratosphère ; en effet, l'absorption des rayons UV du Soleil par l'ozone fut rapidement désignée comme la responsable du profil de température de la stratosphère en fonction de son altitude.

[29] Toutefois, dès la fin du XIX^{ème} siècle, de nombreux corps de métiers voient dans les technologies de télédétection des possibilités nouvelles. Les programmes de recherche sur la haute atmosphère, pilotés depuis les observatoires astronomiques, mobilisent à eux seuls des instruments et des compétences instrumentales multiples : les spectrographes, les photomètres et les interféromètres des « spectrographes » ; les mesures d'absorption exercée sur la lumière des astres et les analyses des émissions des « physiciens » et des « astronomes » ; les électromètres, magnétomètres, *etc.* des « électriciens » ; les méthodes d'étude de propagation des signaux des « radioélectriciens » et des « acousticiens » ; ou encore les théodolites et méthodes de triangulation photographique des « géodésiens » pour situer les phénomènes dans l'espace atmosphérique tridimensionnel. La mode est alors au développement de technologies utilisant les propriétés des ondes électromagnétiques ou sonores. [Barbier & Chalonge, 1942, pp. 38-62]

Dès lors, les astronomes utiliseront préférentiellement ces technologies, afin d'obtenir des informations sur les caractéristiques physiques et chimiques de l'espace (dont les atmosphères des planètes) et sur la haute atmosphère terrestre (Ex : les rayonnements émis dans la haute atmosphère suite à des excitations de ses composés ; la nature des gaz traversés par les rayonnements solaires avant leur arrivée au sol). Ces instruments de télédétection – la spectroscopie, mais aussi tous les autres instruments de *télédétection "à ondes"* (radars, lidars, *etc.*) – demeurent les plus utilisés par les physiciens de la haute et moyenne atmosphère. Les météorologistes et chimistes de la basse atmosphère en ont fait un usage accru, en particulier à partir des années 1980.

Ce programme est stimulé trois décennies plus tard par les mesures d'ozone réalisées en 1919-20 à Marseille par M.P.A.C. Fabry et H. Buisson, à l'aide d'un interféromètre dit de « Fabry-Pérot », instrument optique qu'ils utilisent comme instrument de spectroscopie pour séparer des longueurs d'ondes très proches, donc comme un spectrophotographe.[30] Dans les années qui suivent, il se poursuit principalement à Oxford, d'abord sous l'impulsion de Frederick Lindemann. La Première guerre mondiale achevée, ce dernier a été nommé 'Professor of Experimental Philosophy' à Oxford, et a repris son travail sur les phénomènes atmosphériques. Ses suggestions selon lesquelles les dépressions et les anticyclones pourraient être causés par des différences de concentration d'ozone dans l'atmosphère « incitent » son collègue Gordon Dobson (1889-1976 ; voir Figure 3 ci-dessous) « à s'essayer à la réalisation de mesures régulières d'ozone atmosphérique sur une base quotidienne, dans la lignée des quelques mesures faites peu avant par Fabry et Buisson à Marseille ». G. Dobson poursuit : « Il était clair que ce travail nécessiterait de prendre des spectres de lumière solaire à toutes les heures de la journée, et que chaque opportunité d'apparition du soleil devrait être saisie lors des jours nuageux ». Une hutte est alors bâtie dans le jardin de 'Boars Hill', à six kilomètres d'Oxford. Une moitié est utilisée comme atelier, et l'autre moitié comme laboratoire contenant une très petite chambre noire photographique. Bientôt, Dobson et ses collègues d'Oxford intègrent un prisme de Féry dans leur spectromètre et aboutissent à une première version de leur spectrophotomètre « de Féry » en 1924, après trois années de développement. [Dobson, 1968, p. 388-390]

[30] Un *spectromètre* est un appareil de mesure permettant de décomposer une quantité observée – un faisceau lumineux en spectroscopie, ou bien un mélange de molécules en spectrométrie de masse – en ses éléments simples (qui constituent son spectre). En optique, il s'agit d'obtenir les longueurs d'onde spécifiques constituant le faisceau lumineux (spectre électromagnétique). On utilise donc le spectromètre comme photomètre (appareil mesurant l'intensité lumineuse), et on le désigne par le terme *spectrophotomètre*. De façon générale, l'étude des spectres est appelée spectrométrie. Pour un mélange chimique, il s'agira d'obtenir les masses spécifiques de chacune des molécules (spectre de masse), et en acoustique, d'analyser la composition d'un signal sonore. Quant au *spectro(photo)graphe*, il n'est autre que la version "graphique" et, le plus souvent "photographique" du spectro(photo)mètre – version qui a pratiquement disparue aujourd'hui.

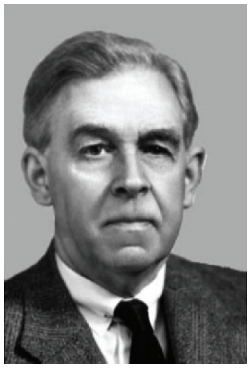


Figure 3 : Photographie de Gordon Dobson vers 1950
[Bojkov, 2010, p. 13]

Trois questionnements pérennes naissent des premières mesures d'ozone au-dessus d'Oxford

Dès la première année de mesures à Boars Hill, G. Dobson et ses collègues mettent en exergue trois questions scientifiques qu'ils jugent cruciales. La première concerne *les variations journalières* d'ozone (dont il était difficile de déterminer si elles étaient des artefacts), ainsi que *leurs fluctuations saisonnières*. Ces dernières font l'objet d'une publication dès 1926 (Dobson & Harrison, 1926, *Proc. Roy. Soc. London*), qui fait état de concentrations maximales d'ozone au printemps, et minimales en automne (au-dessus d'Oxford), sans que la raison de cette variation annuelle ne soit connue [Dobson, 1968, p. 391]. En 1942, Barbier et Chalonge jugeront « importants » les « résultats » obtenus au sujet des variations annuelles d'ozone atmosphérique par Dobson, au cours des dix-huit années qui venaient de s'écouler. En particulier, les séries de mesures qui avaient montré que, « dans l'hémisphère nord, l'épaisseur réduite moyenne d'ozone pass[ait] par un maximum en mars et par un minimum en octobre » (extrema d'autant plus importants que les latitudes étaient grandes) – et, dans l'hémisphère sud, le phénomène était inversé (Voir Figure 4 ci-dessous). [Barbier & Chalonge, 1942, p. 53]

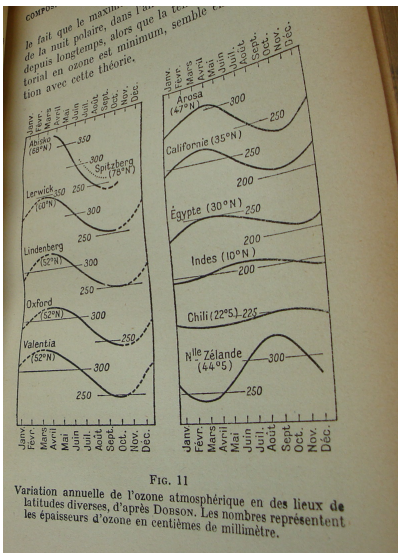


Fig. 11
Variation annuelle de l'ozone atmosphérique en des lieux de latitudes diverses, d'après Dobson. Les nombres représentent les épaisseurs d'ozone en centièmes de millimètre.

Figure 4 : Variations annuelles de la colonne totale d'ozone, c'est-à-dire de la quantité totale d'ozone atmosphérique se trouvant au-dessus d'un point particulier (en « centièmes de millimètre »), « en des lieux de latitudes diverses », d'après les travaux de Dobson entre 1924 et 1942
[Dobson, 1924-42 **in** Barbier & Chalonge, 1942, « Fig. 11 », p. 53]

Comme en témoignent les graphes de la Figure 4 ci-dessus, une deuxième question posée par Dobson concerne *les différences de profils d'ozone entre latitudes*.[31] Pour Dobson, il s'agit avant tout d'utiliser l'ozone comme un "traceur" des dynamiques atmosphériques à grande échelle. Une longue tradition d'études avait amené à penser que ces mouvements se faisaient pour l'essentiel dans des "cellules" disposées dans chaque hémisphère selon une direction approximativement nord-sud.[32]

Enfin, la troisième thématique qui mobilise Dobson est celle de *l'altitude* à laquelle situer des concentrations anormalement élevées d'ozone. Il s'agit même du premier objectif de l'étude que Dobson mène, sous la direction de Lindemann, en 1921-1922. Celle-ci n'est cependant pas effectuée à l'aide d'instruments de spectroscopie, mais à l'œil nu, par

[31] D'après les scientifiques d'aujourd'hui, les valeurs caractéristiques d'ozone des moyennes latitudes des deux hémisphères à un temps *t* sont généralement semblables. L'épaisseur maximale de la colonne d'ozone est mesurée en fin de printemps, ce qui s'explique par le transport de l'ozone par les vents stratosphériques, depuis l'équateur (où il est principalement formé) vers les pôles. En outre, la *diminution naturelle* de l'ozone stratosphérique la plus importante *au-dessus de l'Antarctique* se fait durant l'hiver austral (septembre-octobre), et la plus importante au-dessus de l'Arctique se fait pendant l'hiver boréal (décembre-février) (mais *dans une quantité moindre qu'en Antarctique*). Enfin, les fluctuations saisonnières de la colonne d'ozone ne sont pas de la même amplitude d'une année sur l'autre ; l'introduction d'un mécanisme hémisphérique non annuel, l'« Oscillation Quasi Bisannuelle (Q.B.O.) », qui voit l'inversion de la direction des vents stratosphériques (qui font le tour du globe, soit en direction de l'est, soit en direction de l'ouest) tous les 15 à 20 mois, peut en partie expliquer les fluctuations des quantités d'ozone aux latitudes moyennes et élevées d'une année sur l'autre.

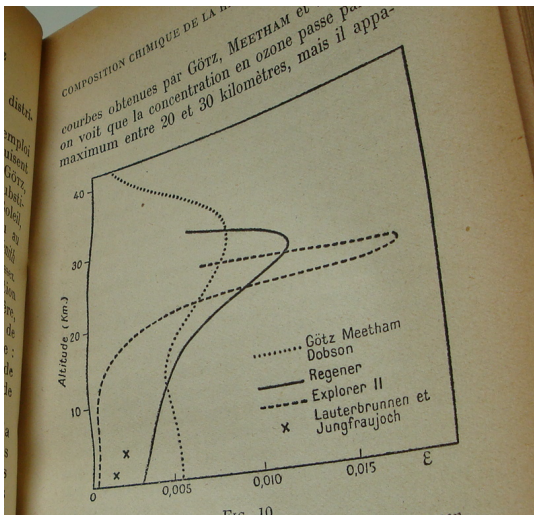
[32] La circulation atmosphérique hémisphérique compte de nos jours trois grandes "cellules" : la cellule dite « polaire », la cellule dite « de Ferrel » et la cellule dite « de Hadley ». Ces appellations témoignent de la précocité d'hypothèses théoriques sur les grands flux de masses d'air que l'on rencontre entre les pôles et l'équateur – auxquelles s'étaient, en effet, essayés William Ferrel (1817-1891) et George Hadley (1685-1768).

La circulation tropo-stratosphérique à l'échelle de l'hémisphère, que proposeront dans les années 1950 Dobson et Brewer à partir de leurs études sur l'ozone et la vapeur d'eau (voir Chapitre 2), sera également schématisée par de grands flux convectifs et advectifs approximativement de types nord-sud-nord ou sud-nord-sud, mais ne portera pas le nom de cellule (elle sera finalement nommée "circulation de Brewer-Dobson").

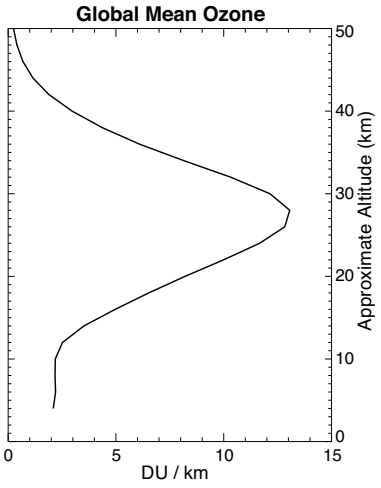
l'observation de météorites, qui donne des renseignements sur la densité et la température de la haute atmosphère, et subséquemment sur la présence d'ozone à ces altitudes. Dobson identifie la région la plus chaude de la stratosphère vers 50 kilomètres d'altitude. Il propose que ces fortes températures soient corrélées à la présence d'ozone dans la haute atmosphère. Les mesures de propagation d'ondes sonores dans la haute atmosphère de Whipple « confirmeront » l'hypothèse de l'existence d'une telle région chaude dans la haute atmosphère (Whipple, 1932, *Quart. J. Royal Meteorol. Soc.*). [Dobson, 1968, pp. 387-388]

Les observations des trajectoires de météorites à l'œil nu montrent rapidement leurs limites. A partir des années 1930, l'altitude de l'ozone est déterminée à l'aide d'instruments et de protocoles nouveaux – dont la méthode dite "Umkehr" du Suisse Paul Götz.[33] L'accomplissement d'une coopération interinstrumentale efficace, faite de mesures physico-chimiques *in situ* (par ballons, avions, fusées), et de mesures spectrométriques réalisées pour toute la colonne verticale (lorsqu'effectuées depuis le sol ou, plus tard, depuis l'espace) voire pour une partie de la colonne (à l'aide d'un spectromètre disposé à bord d'un ballon-sonde), constitue un défi pour résoudre la question de l'altitude de la couche d'ozone (et plus généralement, pour mener des travaux sur l'ozone). D'abord identifiée sur une gamme d'altitude large, entre 15 et 50 km, un consensus émerge au milieu des années 1930 autour d'une altitude de la couche d'ozone située autour de 20-30 km (voir ci-dessous la Figure 5(a) pour les années 1930, et la Figure 5(b) pour 2010). En 1986-87, la détermination des concentrations d'ozone en fonction de l'altitude redeviendra un enjeu important, dans les campagnes de mesure d'ozone en Antarctique. Afin de modéliser le phénomène de "trou de la couche d'ozone" au-dessus de l'Antarctique, il deviendra en effet décisif de déterminer empiriquement l'altitude exacte de la destruction de l'ozone (il sera établi que le phénomène de destruction se produit significativement entre 12 et 25 km). [Christie, 2000, pp. 12 & 59]

[33] La problématique de cartographie verticale de l'ozone mobilisa de nouvelles technologies, et impliquera une plus grande collaboration interinstrumentale, ainsi que de nouveaux protocoles de mesure. Quant aux mesures spectroscopiques, puisqu'elles mesuraient la colonne totale d'ozone, il fallut qu'une méthode soit élaborée pour obtenir les concentrations d'ozone à une altitude donnée. Au tournant des années 1930, Paul Götz développa une méthode dite "Umkehr" (littéralement, « demi-tour » en allemand), encore utilisée, qui consiste à mesurer l'intensité des spectres UV du zénith, lors de l'ascension et du coucher du soleil. [Bojkov, 2010, p. 14 ; Dobson, 1968, p. 396]



(a)



(b)

Figure 5 : (a) Amplitude moyenne des concentrations d'ozone en fonction de l'altitude (en km), d'après différents travaux de référence des années 1930,[35] et (b) d'après le dernier rapport du groupe d'experts internationaux sur la destruction de l'ozone ('WMO/UNEP/… Scientific Assessments of Ozone Depletion')
[Barbier & Chalonge, 1942, « Fig. 10 », p. 51 ; *WMO*/…, 2011, p. 238]

Gordon Dobson et Oxford à la tête d'un réseau international

G. Dobson demeurera jusqu'à ses vieilles années (il décède en 1976) une figure emblématique de la science de l'ozone. Inlassablement, il se remettra en route pour aller mesurer l'ozone sous de nouvelles latitudes, s'attellera à situer la couche d'ozone sur l'altimètre, et cherchera à comprendre les variations saisonnières d'ozone. Jusque dans les années 1960, il bénéficiera d'une autorité incontestée au sein de la communauté de l'ozone. En effet, pour commencer, il avait été, à la fin des années 1920, l'un des premiers spécialistes de la question, l'un des premiers à développer un spectroscope à ozone, et avait pu bénéficier de l'aide financière de la 'Royal Society' (dont il est devenu 'Fellow' dès 1927, à l'âge de 38 ans seulement). Par la suite, il saura centraliser les mesures d'ozone à Oxford, et prendra la tête de l''International Ozone Commission' (IO3C) de l'ICSU après-guerre.

Aux yeux de G. Dobson, la priorité absolue demeurera toujours le développement d'instruments de mesure, et en particulier de ses instruments – son spectrophotomètre de Féry, puis de ses spectromètres photoélectriques (à partir de 1930), qu'il n'aura de cesse de réviser, entre 1920 et les années 1970 (il décède en 1976). Au milieu des années 1920, le physicien-météorologiste anglais décide d'effectuer grâce à eux des mesures loin d'Oxford.

[35] a – Götz, Meetham & Dobson : Détermination « indirecte » par mesure de la colonne d'ozone (par méthode géométrique, en effectuant une méthode de concentration avec le soleil (ou préférentiellement le ciel bleu) au zénith, puis une autre lorsque le Soleil est bas sur l'horizon) ;
b – Regener ; c – *Explorer II* : Détermination directe à l'aide de spectrographes légers et à fonctionnement automatique, emportés jusqu'à 30 km d'altitude en ballon-sonde ;
d – mesures systématiques effectuées à Lauterbrunnen (alt. 800 m) et au Jungfraujoch (alt. 3400 m) : Détermination directe au sol (méthode non précisée).
[Barbier & Chalonge, 1942, pp. 50-51]

Dobson escompte bien sûr obtenir des réponses aux trois questions cruciales que nous avons énoncées, mais également, dans le même temps, tester ses instruments standardisés sous différentes conditions atmosphériques. Si l'on peut expliquer les disparités de résultats d'un instrument à l'autre par les conditions physiques dans lesquels ils se trouvent, on accroît la confiance dans le type d'instrument utilisé. En 1925, à la faveur d'une allocation de la 'Royal Society', Dobson peut acquérir cinq prismes de Féry et cinq tubes de silice pour les filtres chlore-brome. Les cinq nouveaux instruments sont « calibrés et comparés à l'instrument original », à Boars Hill, relate Dobson, puis « répartis en divers endroits, en Europe, afin d'étudier la *distribution* de l'ozone en relation avec la *distribution* des pressions, *etc.* » [Dobson, 1968, p. 391]

Outre le fait d'accroître la confiance dans son dispositif par cette inter-instrumentalité,[36] l'opportunité est offerte de mettre en réseau les instruments, afin d'obtenir des mesures concomitantes d'ozone en différents points. Ceci nécessite, dans un premier temps, de faire marcher les réseaux *humains* à travers l'Europe. Ce sont les météorologistes, plutôt que les astronomes, qui sont cooptés, par l'intermédiaire du 'British Meteorological Office', qui contacte les stations météorologiques de Valentia (Irelande), Lerwick (Ecosse), Abisko (Suède), Lindenberg (Allemagne), *etc.* Les météorologistes trouvent plusieurs intérêts à étudier l'ozone (nous reviendrons sur ce point) ; de plus, les stations météorologiques sont plus nombreuses, et tout aussi aptes que les observatoires à recueillir les instruments plutôt légers et mobiles que sont les spectromètres Dobson. Le 'Lichtklimatisches Observatorium' de Paul Götz, à Arosa (Suisse), fait exception. [Dobson, 1968, p. 391]

Ensuite, ce réseau implique une main-d'œuvre pour les travaux routiniers de collecte des données (des « yeux éduqués (tutored eyes) », à l'image de ceux que Peter Galison voit

[36] L'historienne des sciences Catherine Allamel-Raffin définit « l'inter-instrumentalité » comme le fait de recourir consécutivement, au cours d'une même étude expérimentale, à des instruments conçus sur des principes physiques différents, chaque instrument délivrant un type d'information spécifique à propos des objets étudiés (d'ordre chimique, topographique, magnétique, électronique, *etc.*). Dans *Representing and Intervening* (1983), Ian Hacking avait avancé l'idée que la fiabilité au sujet de la réalité de ce que l'on observe augmente lorsque des interactions technophysiques différentes conduisent à des résultats pouvant être mis en correspondance ; car l'inter-instrumentalité (qu'I. Hacking nomme « argument de la coïncidence » (« *argument from coincidence* »)) augmenterait les chances de ne pas se retrouver en présence d'un artefact. [Allamel-Raffin, 2004].

Avec l'inter-instrumentalité viennent nécessairement les exercices d'inter-comparaison. A défaut de pouvoir comparer ses résultats à ceux d'autres types d'appareils, pour la stratosphère tout le moins, Dobson le fit d'abord avec des appareils du même type (et tous calibrés par ses soins). Par contre, l'inter-instrumentalité des mesures d'ozone deviendra plus foisonnante dans les années 1930, avec les spectromètres de Götz, de Meetham, d'Erich H. Regener et de l'ensemble du réseau de Dobson (même si la plupart de ses instruments avaient été fabriqués chez R. & J. Beck Ltd, d'après un cahier des charges établi par Dobson et ses collègues d'Oxford). En 1934, E.R. Regener, accompagné de son fils Victor H. (qui développera comme son père des méthodes de mesure d'ozone – notamment, au début des années 1960, une sonde chimiluminescente pour mesurer l'ozone *in situ*), réaliseront des ascensions à bord des grands ballons en caoutchouc jusqu'à une altitude de 33 km. Equipés de spectrographes à quartz, les Regener seront à cette occasion les premiers à estimer l'altitude du maximum d'ozone, vers 22 km. A la fin des années 1930, les ballons-sondes états-uniens habités 'Explorer II' effectueront de grandes campagnes de mesure *in situ*, qui seront marquantes pour la science de l'ozone stratosphérique. Puis, viendra le tour des avions, au cours de la Seconde Guerre mondiale (voir Chapitre 2). [Dobson, 1968 ; Bojkov, 2010]

mobilisés pour faciliter l'accession de la microphysique à « l'objectivité (mécanique) » au début du XX^{ème} siècle [Galison, 1997 ; voir également Daston & Galison, 2007]). « Dans le travail avec les spectrophotomètres photographiques, raconte G. Dobson, les observateurs de toutes les stations recevaient des plaques photographiques [vierges]. On leur demandait seulement de charger ces plaques sur leurs supports, de les exposer à la lumière, d'écrire la date et le lieu sur le bord de la plaque, et de remballer les plaques dans leur paquet originel et de les renvoyer à Oxford. […] Il y eut beaucoup de travail à fournir lorsque les plaques commencèrent à nous parvenir des différentes stations, car il fallait les développer, réaliser des mesures et [finalement] calculer l'ozone. Heureusement, poursuit le Britannique, le DSIR ('Department of Scientific and Industrial Research') s'intéressa à notre travail, et nous attribua une bourse pour un assistant à mi-temps, qui réalisa les mesures [sur les plaques] et calcula les valeurs d'ozone. » [Dobson, 1968, p. 392]

Enfin, la logique de multiplication d'instruments standardisés sur le modèle des spectromètres d'Oxford rend favorable une collaboration avec l'industrie. A la fin des années 1920, l'industriel 'R. & J. Beck Ltd' est approché, et accepte le contrat. « Si nous trouvions l'argent, relate Dobson, il produirait un instrument prototype pour £500. Heureusement, la 'Royal Society' fut d'accord pour nous fournir cette somme et l'instrument No. 2 fut livré en temps utile à 'Boars Hill', où devaient être effectués les ajustements et la calibration de l'instrument. L'instrument qu'avait produit Beck était optiquement identique à [notre] instrument No. 1. En revanche, la construction mécanique était entièrement différente, afin d'être en adéquation avec leurs méthodes d'usinage, *etc.* Après que l'instrument de Beck eut montré satisfaction, quelques instruments supplémentaires furent commandés, les premiers étant destinés à l'Egypte et à la Chine. » [Dobson, 1968, p. 395]

La mise en réseau du spectrophotomètre de Dobson se fait donc à présent à l'échelle transcontinentale. En outre, un spectrophotomètre confectionné par Hilgers à la 'Smithsonian Institution' est envoyé en 1925 à Boars Hill, pour y être calibré en même temps que les cinq instruments de Dobson, avant de traverser l'Atlantique jusqu'à Montezuma, au Chili. Les plaques photographiques sont ensuite retournées à Oxford, tout comme cela avait été fait avec les plaques européennes. En 1927, l'instrument de Montezuma sera transféré en Nouvelle-Zélande. Suivent, dans les années 1930, des commandes de l'Egypte et la Chine, qui acquièrent une version manufacturée de l'instrument (toujours de l'entreprise R. & J. Beck Ltd) [Dobson, 1968, p. 395]. Oxford et Dobson tissent de la sorte un cercle mondial de mesures d'ozone, dont ils occupent le centre.

Enfin, si l'on place l'entreprise initiée par Dobson dans une histoire plus longue, les stations de mesures systématiques de la colonne d'ozone établies durant les années 1920-30

constituent « l'épine dorsale » du réseau international actuel, le 'Global Ozone Observing System' (GO3OS), baptisé ainsi lors de l'Année Géophysique Internationale (AGI ; 1957-58). Avec les mesures par satellites, effectuées de manière routinière depuis 1979, ces réseaux spectrométriques de la colonne d'ozone constituent le second pilier des mesures d'ozone contemporaines. [Bojkov, 2010, pp. 12-14]

A la fin de la campagne de mesures européennes de 1926-27, plus de cinq mille spectres ont été mesurés, et les valeurs d'ozone calculées. Les chercheurs affiliés aux stations de mesures montées par Dobson tirent bénéfice de leur collaboration avec Oxford. Certains confectionnent leur propre spectrophotomètre, et inventent leur propre mode opératoire.[38] Et, « afin de perpétuer l'intérêt de ceux qui effectuent les photographies dans les différentes stations, écrit Dobson, les valeurs quotidiennes d'ozone [, et parfois les cartes météorologiques journalières,] sont dupliquées chaque mois et envoyées à toutes les stations coopérant » (ainsi qu'à « toutes les personnes intéressées ») [Dobson, 1968, p. 392]. Cependant, la fabrication des résultats n'en demeure pas moins effectuée lors du passage des plaques photographiques dans les mains des chercheurs d'Oxford, ce qui donne à ces derniers une longueur d'avance, et même un pouvoir de contrôle sur les autres chercheurs de l'ozone. L'équipe d'Oxford se trouve en position de produire les résultats, de juger la cohérence des mesures des différentes stations, et a de plus la primeur des résultats. Ces trois pouvoirs sont en tout cas réels à la fin des années 1920.[39] Dobson et ses collègues peuvent par exemple soumettre à communication les résultats obtenus pour l'Europe entre juillet 1926 et décembre 1927 auprès de la 'Royal Society'. Des synthèses sont présentées à deux reprises aux membres de la Royal Society [Dobson, 1968, p. 392], et publiées dans les *Proceedings of the Royal Society of London* (Dobson G.M.B., Harrison D.N. & Lawrence J., 1927, *Proc. Roy. Soc. London*, A114, p. 521).

---

[38] Pour la France entre 1923 et 1940, voir les travaux de Daniel Barbier et Daniel Chalonge (« Daniel Chalonge, Daniel Barbier et les instruments. 1923-1973 », http://chalonge.obspm.fr/Instruments_Chalonge.pdf (le 02/02/2012)).

[39] Comme le décrit Bojkov, cette hégémonie était particulièrement réelle à la fin des années 1920 :

> " The first network for daily ozone measurements was initiated by Gordon M. B. Dobson from Oxford. Following the method established by Fabry and Buisson he adopted a UV quartz spectrograph using the Fèry curved-prism and did built six such ozone spectrographs with a grand from the Royal Society London (Dobson and Harrison, 1926; Fèry, 1911). After 1925 he dispatched these to different meteorological Services for a year or two in order to study the behaviour of atmospheric ozone in the world and its eventual use in the weather forecasting. Thus, observations were collected in 1926-27 from Abisko, Lerwick, Valentia, Oxford, Lindenberg, Arosa and Montezuma; in 1928-29-30 from Oxford, Arosa, Table Mountain, Helwan, Kodaikanal and Christchurch. More than 6000 plates of the spectrographs have been developed and analysed in Oxford. From this data base Dobson *et al.* (1927, 1929) deduced the basic knowledge of meridional and seasonal ozone distribution: less ozone in the tropics and during the summer and more ozone poleward and during the spring season." [Bojkov, 2010, pp. 12-14]

Cependant, le savoir-faire pour produire les données à partir des plaques photographiques devint rapidement inutile, avec le passage aux appareils numériques, dont les nouveaux spectromètres, photoélectriques, de Dobson (le premier prototype date de 1930). La centralisation des données demeurait toutefois un enjeu.

Par ailleurs, les budgets obtenus auprès de la 'Royal Society' permettent à Dobson, à la fois d'acheter du matériel et de voyager pour réaliser ses "transferts de technologies",[40] et ainsi imposer son instrument à l'étranger. En 1932, il peut ainsi se rendre à Arosa en Suisse alémanique (voir Figure 6), afin d'y rencontrer l'autre grande figure émergente de l'ozone en Europe, Paul Götz, auquel il laisse l'un de ses instruments. « Comme souvent à Oxford » explique G. Dobson, cette année « nous n'avions guère de journées avec des cieux de clairs zéniths, sur lesquels nous pourrions obtenir de bonnes courbes Umkehr. Aussi, Götz nous invita gentiment à lui rendre visite à Arosa, où nous fut prêté un logement. Meetham et moi passâmes ainsi six semaines à Arosa en 1932, avec nos instruments No. 1 et 2 (le deuxième ayant été récemment produit par Beck). […] Un instrument fut laissé à Arosa, d'où Götz nous envoya par la suite les mesures qu'il y avait réalisées. Nous effectuâmes les calculs à Oxford. Le résultat principal de ces mesures à Arosa fut de montrer avec certitude que l'altitude moyenne de l'ozone dans l'atmosphère était d'environ 22 km, et non d'environ 40-50 km comme on l'avait pensé auparavant. » [Dobson, 1968, pp. 391 & 395-396]

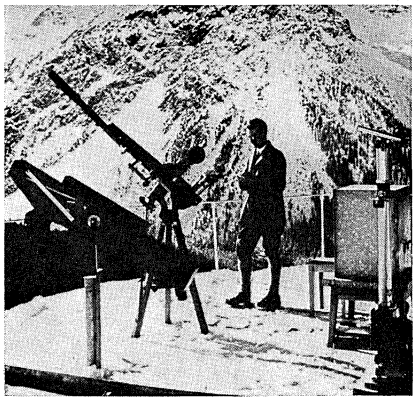


Fig. 6. Early observations at Arosa. From left to right are the Féry ozone spectrograph, Dr. Chalonge with his spectrograph, and part of the Fabry-Buisson spectrograph.

Figure 6 : Instruments de mesures disposés en 1926-27 à Arosa, dans les Alpes. La communauté de l'ozone juge les mesures d'ozone de la station d'Arosa comme des références pour leur qualité et leur longévité
[Dobson, 1968, « Fig. 6 », p. 391]

[40] Dans le champ des STS, les "transferts de technologies" désignent plutôt le transfert d'innovations techniques, provenant de la recherche universitaire ou privée, vers l'industrie, dans un but de commercialisation (voir par exemple les travaux de Benoît Godin et la revue *Journal of Technology Transfer*). Dans le cas de Dobson, il s'agit de « transferts de technologie » *internes à la communauté scientifique publique*. Deux brillantes études sur ces transferts technologiques ont été menées par un tenant des *Social Studies of (Scientific) Knowledge*, Harry Collins, dès les années 1970 : les problèmes de réplication par plusieurs laboratoires anglais d'un laser mis au point au Canada vers 1970 (tous ne sont pas parvenus à répliquer le laser, et ceux qui ont réussi n'ont pas toujours su dire pourquoi) ; la controverse autour de la détection d'ondes gravitationnelles, entre 1970 et 1975 (les dispositifs donnaient des résultats inconciliables, et, défend H. Collins, il fallut, pour sauver la théorie des ondes gravitationnelles et « clore la controverse », mettre hors jeu l'expérience du physicien Weber à l'aide de « facteurs extralogiques » (c'est-à-dire « sociaux »), sans « qu'à aucun moment son expérience ait été réellement reproduite, ni que les questions soulevées aient été réellement tranchées, ni que tous les résultats expérimentaux […] aient été compris ou expliqués »). [Martin, 2000, pp. 87-89 ; *cf.* Collins, 1975 **in** Collins, 1985, *Changing Order. Replication and Induction in Scientific Practice* & Collins, 1975, « Les sept sexes : étude sociologique de la détection des ondes gravitationnelles » **in** Callon & Latour (Dir.), 1991, *La Science telle qu'elle se fait*]

A la faveur des voyages de Gordon Dobson, et de ses publications qui avançaient des réponses aux trois questionnements listés dans la Sous-Section précédente, les spectrophotomètres de Dobson s'imposèrent rapidement. Ils resteront hégémoniques presque jusqu'à sa mort, puis cohabiteront jusqu'à nos jours avec un modèle alternatif développé dans les années 1960-70, et nommé d'après l'un de ses premiers développeurs, Alan Brewer, qui avait travaillé sous l'égide de G. Dobson pendant la Seconde guerre mondiale puis était devenu Président de l'IO3C entre 1965 et 75 (voir Chapitre 2).

Au-delà des impacts immédiats sur la recherche européenne sur l'ozone dans les années 1930, la tradition européenne de mesures systématiques d'ozone allait se poursuivre et rester en pointe jusqu'aux années 1970 – moment où la recherche aéronomique états-unienne, qui était déjà devenue de loin la plus financée dès l'immédiat après-guerre, se verra de plus stimulée par les alertes à la destruction d'ozone par les émissions d'avions supersoniques et les CFC. G. Dobson sera la figure de référence de la recherche européenne puis internationale sur l'ozone pendant ces quatre décennies 1930-60. Afin d'étendre son réseau de mesure d'ozone, Dobson utilisera notamment pour levier un organe de l'ICSU, l'IO3C ('International Ozone Commission'), dont il sera le premier président de 1948 à 1960, ainsi que l'Année géophysique internationale (AGI ; 1957-58) (voir Chapitre 3).

A l'image de Charles T.R. Wilson (1869-1959), concepteur d'une « chambre à nuages » transformée en détecteur de particules – et avec lequel il collabora brièvement (au début des années 1910, sur des mesures de vitesse verticale des vents) –, G. Dobson avait conquis sa renommée et son autorité comme expérimentateur et concepteur d'instruments. Wilson obtint le Prix Nobel de Physique en 1927, alors que Gordon Dobson cumula les postes prestigieux (Fellow of the Royal Society (1927-…) ; Président de la 'Royal Meteorological Society' (1947-1949)) et les distinctions de ses pairs et de son Etat ('Order of the British Empire', 1951). Ses instruments étaient devenus les instruments de référence. De plus, contrairement à Wilson, qui laissa à d'autres le soin de développer sa chambre à brouillard devenue détecteur de particules, Dobson resta le principal développeur et prosélyte de son instrument jusqu'à ses vieux jours [Galison, 1997, "Chapter 2", pp. 65-142]. Enfin, Dobson ne se contenta pas de centraliser les mesures d'ozone pour publication, mais endossa le rôle de porte-flambeau des recherches sur l'ozone dans les organisations internationales de l'ICSU, d'abord au sein du 'Committee on Ozone' de l'IUGG ('International Union of Geodesy and Geophysics' ; 1919-…), puis au sein de l'IO3C à partir de 1948…[41] Ce qui, en retour, lui permit d'accroître encore son réseau d'instruments et de collaborateurs.

[41] Plus généralement, Oxford fut le centre du réseau de mesures d'ozone jusqu'au lendemain de la Seconde guerre mondiale. Les premiers président et secrétaire de l'IO3C désignés en 1948, respectivement Dobson et

Son article autobiographique relatant ses « quarante ans de recherche sur l'ozone atmosphérique à Oxford » débute de cette manière :

> « Le développement de la recherche sur l'ozone atmosphérique à Oxford remonte à l'année 1922, quand un unique instrument y fut utilisé pour faire des mesures de [la colonne] totale d'ozone, et s'achève en 1966. Une centaine d'instruments étaient alors distribués dans le monde entier. »

Et se conclut ainsi :

> « Je suis certain que Fabry et Buisson auraient été heureux de voir la manière dont leur travail de 1920 avait évolué vers un réseau mondial de stations réalisant des mesures quotidiennes d'ozone atmosphérique. Peut-être plus important pour la compréhension de la météorologie de la troposphère et de la stratosphère sont les nombreuses mesures de distribution verticale de l'ozone faites à l'aide de la méthode Umkehr [(ou « méthode inverse »)] de Götz et des sondes à ozone développées par Brewer et Regener. En particulier, les magnifiques séries d'ascensions réalisées du Panama à Thule [au Groenland], en passant par l'Alaska. » [Dobson, 1968, pp. 387 & 405]

Dobson réaffirme ainsi son appartenance à une tradition de scientifiques itinérants, et surtout *expérimentateurs*.

Dans les années 1980, l'accent sera mis sur les *mesures* empiriques d'ozone, en particulier après l'annonce du "trou" de la couche d'ozone en 1985. Toutefois, le Prix Nobel sera pourtant attribué à trois théoriciens de l'ozone, Crutzen, Molina et Rowland, et non, par exemple, à Farman, responsable des séries de mesures fondatrices de la théorie du "trou" de la couche d'ozone, ni à ceux qui avaient dirigé les campagnes de mesures sur l'ozone stratosphérique polaire à la fin des années 1980 (Susan Solomon, Robert « Bob » Watson).

Pour conclure, plusieurs facteurs peuvent être invoqués pour justifier l'accession de Gordon Dobson au sommet de la hiérarchie de la communauté d'étude de l'ozone. Tout d'abord, plusieurs raisons peuvent expliquer pourquoi le pays de G. Dobson, le Royaume-Uni, fut le premier moteur de ces mesures d'ozone (la longue tradition astronomique d'étude du ciel et d'étude météorologique, l'opulence économique du pays, voire sa forte tradition

Sir Charles Normand (qui avait rejoint la recherche sur l'ozone seulement en 1947), étaient d'Oxford. « Alors que Normand était Secrétaire de l'International Ozone Commission, rapporte Dobson, ses quartiers généraux étaient à Oxford, et le recueil et la diffusion des données d'ozone de toutes les stations devinrent partie intégrante de ses nouvelles fonctions officielles. [Oxford] entreprit également la coordination générale du travail [à l'échelle internationale], de telle sorte que les résultats des différentes stations fussent le plus possible comparables les unes aux autres. » [Dobson, 1968, p. 400]

expérimentale en sciences physiques). Ensuite, on peut avancer une hypothèse disciplinaire. Dans les milieux des météorologistes comme des astronomes, que fréquentait tous deux G. Dobson dans les années 1930-60, la bonne observation, la bonne mesure est souvent le point crucial, l'accomplissement le plus délicat.[42] Enfin, pour s'imposer au sommet de la hiérarchie des études sur l'ozone d'une manière presque "naturelle", comme ils y parvinrent, Dobson et ses collègues d'Oxford furent sûrement d'excellents "entrepreneurs", capables de lever des fonds, et de créer un réseau d'influence et de dépendance internationale. Tous ces aspects demanderaient une étude approfondie, que nous ne pouvons mener ici.

Une chose est certaine. En centralisant le traitement des données dans son laboratoire, en réussissant à imposer la matrice de ses instruments et son mode opératoire, en faisant marcher les leviers financiers de la 'Royal Society' pour distribuer ses instruments et rencontrer ses pairs à travers l'Europe, Gordon Dobson avait assis durablement son autorité sur la communauté de l'ozone.

1.2. La formalisation des réactions chimiques dans la haute atmosphère

Comme en témoigne l'état de l'art de la science *de la Stratosphère à l'Ionosphère*, signé en 1942 par D. Barbier et D. Chalonge, la communauté de chercheurs s'intéressant à l'ozone stratosphérique dans les années 1920 et 1930 se limite à une poignée de géophysiciens et d'astronomes, ouest-européens pour la plupart, qui cherchent à estimer les caractéristiques physico-chimiques de la moyenne et haute atmosphère (température, pression, composition physico-chimique, flux radiatifs et dynamique des masses d'air, présence de particules chargées électriquement, *etc.*), en vue d'expliquer certains phénomènes observés (éclairs, aurores boréales, transport d'aérosols sur de longues distances, *etc.*). Le développement d'instruments capables de mesurer efficacement l'ozone en altitude constitue l'essentiel de la littérature sur l'ozone entre 1890 et 1940, et est principalement le fait de physiciens-astronomes de formation, auxquels se joignent quelques météorologistes [Barbier

[42] L'atmosphère n'est nullement le système isolé du laboratoire, si bien que les "modèles matériels" sont rarement parvenus à reproduire de manière satisfaisante les phénomènes atmosphériques. L'échec de Charles T.R. Wilson, précisément, est emblématique. Dans sa « chambre à nuages ('cloud chamber') », il ne parvint qu'imparfaitement à reproduire un brouillard et un semblant de nuages, à peine semblables à ceux observés dans l'atmosphère. Et encore, il avait dû, pour parvenir à quelque résultat, éloigner les paramètres internes de sa chambre des conditions physiques observables dans l'atmosphère. Il se trouva que sa chambre devient alors utile, non plus pour la météorologie, mais pour la microphysique, sa chambre à brouillard jouant le rôle de détecteur de particules… Une mutation qui valut le Prix Nobel de physique 1927 à C.T.R. Wilson, mais lui fit délaisser son instrument. [Galison, 1997, "Chapter 2"]

& Chalonge, 1942 ; Bojkov, 2010].[43] Toutefois, d'autres chercheurs, eux aussi souvent physiciens-astronomes mais plus volontiers "*théoriciens*", posent dans le même temps les fondations d'*une chimie de la haute atmosphère* (conçue comme globale *a priori*, car elle concerne des couches atmosphériques recouvrant la planète entière). Son premier schème complexe revient à Sydney Chapman, qui propose en 1929 une théorie photochimique des composés oxygénés de la stratosphère devant expliquer, dans un même mouvement, les fortes et constantes teneurs en ozone dans la stratosphère *et* le rôle de filtre à UV(-B) joué par cette région.

Le premier cycle photochimique de l'ozone (1929), fruit de la culture pluridisciplinaire de Sydney Chapman

Contrairement à son contemporain et compatriote Gordon Dobson, Sydney Chapman (1888-1970) n'a pas laissé de document autobiographique sur sa longue carrière, qui lui fit franchir à maintes reprises les barrières disciplinaires, entre études du géomagnétisme, des ionisations et de l'électricité atmosphériques, théorie mathématique des gaz, et chimie.[45] Cet éclectisme n'est pas surprenant pour un astronome et géophysicien du début du XX^{ème} siècle, mais il n'en fut pas moins renforcé par l'objet à peine esquissé que S. Chapman choisit comme objet de prédilection : les moyenne et haute atmosphères, dont Chapman voulut comprendre l'ensemble des mécanismes, et qu'il chercha à modéliser à l'aide d'outils théoriques qu'il voyait s'imposer dans différents champs scientifiques.

Les études universitaires de Chapman débutent à l'Université de Manchester, non loin de sa ville natale. Toutefois, les études d'ingénieur et de physicien qu'il y mène ('B.Sc. in Engineering' en 1907, 'M.Sc in Physics' en 1908) le laissent sur sa faim, si bien qu'il étudie pendant quelques années les mathématiques à Cambridge ('B.A. in Mathematics' en 1911, 'M.A. in Mathematics' en 1914) tout en complétant sa formation à l'Université de Manchester ('D.Sc. in Physics', 1912). Bien qu'il rencontre Bertrand Russell et Alfred Whitehead au cours de ses études de mathématiques à Cambridge, il ne poursuit pas la route avec eux vers la

[43] Bojkov identifie la rencontre des 17-18 avril 1944, à Thrandt, dans l'Allemagne du III^{ème} Reich, comme la première rencontre sur l'ozone avec des discussions détaillées sur les problèmes fondamentaux de la distribution verticale et horizontale de l'ozone et ses changements (Moser) et de la photochimie de l'ozone (O. Hoelper, F. Schröer, Rudolf Penndorf, Alfred et Hedwig Ehmert), sans qu'un temps « trop important » ne soit passé, pour une fois, sur les questions d'instrumentation et de méthodes de mesures, écrit l'aéronome. [Bojkov, 2010, p. 21]

[45] En revanche, Chapman a laissé des bibliothèques entières de données et de publications (sept ouvrages et plus de quatre cents articles), ainsi qu'une correspondance foisonnante. La majeure partie des documents est conservée à l'Université d'Alaska, où Chapman travailla pendant de longues années. Notre récit s'appuie ici en premier lieu sur des extraits, mis en ligne par cette même université, d'un ouvrage collectif rédigé par ses anciens collègues pour son quatre-vingtième anniversaire, intitulé *Sydney Chapman, Eighty: From his Friends* (Akasofu *et al.*, 1968). Nous utilisons également d'autres ressources en ligne, telles que l'introduction à la collection de documents de Chapman sur le site de la NWDA (Northwest Digital Archives), qui offre une description « de sources primaires du nord-est des Etats-Unis, y compris des correspondances, des carnets personnels et des photographies » [http://nwda-db.wsulibs.wsu.edu/findaid/ark:/80444/xv48580 (le 12/10/2011)].

mathématique et la logique "pures". Par contre, demeurera toujours au fondement de la démarche de Sydney Chapman, une volonté de rendre compte des phénomènes physiques et chimiques de l'atmosphère, à l'aide de schèmes complexes et en mobilisant si possible les derniers outils mathématiques.

Parmi les astronomes et physiciens de l'atmosphère du début du XX^{ème} siècle qui ont été célébrés, beaucoup proviennent du Royaume-Uni. En 1910, les deux assistants ("chief assistants") que choisit l'illustre Astronome royal Frank Dyson ne sont autres que Sydney Chapman et Arthur Eddington (qui deviendra célèbre pour ses travaux sur la relativité générale, et notamment ses mesures de courbure de la lumière stellaire lors de l'éclipse solaire du 29 mai 1919). S. Chapman, qui n'a pas encore terminé ses cursus à Manchester et à Cambridge, cumule donc deux voire trois activités entre 1910 et 1914. Il prend néanmoins à cœur la tâche que lui confie F. Dyson : préparer les premières études sur le géomagnétisme dans le nouvel observatoire de Greenwich. Et, c'est au géomagnétisme que Chapman devra ses premières publications.[47] De plus, c'est la pratique de cette science qui va l'amener à faire des phénomènes physico-chimiques de la haute atmosphère son objet de prédilection.

Les manifestations du géomagnétisme en haute altitude, telles que les tempêtes magnétiques et les aurores boréales, conduisent S. Chapman à tâtonner dans différents champs disciplinaires, dont il parcourt studieusement les ouvrages théoriques. Puisque les variations de flux solaires peuvent expliquer les tempêtes magnétiques, Chapman commence par faire une recension des principaux développements de la « *physique solaire* » depuis Gilbert en 1600 (recension reproduite dans Chapman, 1964, *Solar Plasma, Geomagnetism, and Aurora*) ! En outre, les flux radiatifs des rayonnements solaires sont corrélés à la cinétique des gaz dans la haute atmosphère. Le géomagnétisme de Chapman est donc, en définitive, inféodé à plusieurs égards à la *théorie cinétique des gaz*… En fait, l'intérêt du mathématicien Chapman pour cette dernière discipline est peut-être plus ancien que son intérêt pour le géomagnétisme. Très tôt dans sa carrière, il avait cherché à marcher dans le sillage des Boltzmann, Maxwell ou autre Hilbert.[48] [Parker, 1968, "Geomagnetism and Solar Physics" **in** Akasofu *et al.*, 1968]

Après ces années de jeunesse, où il se sentait hautement stimulé par la formalisation mathématique "universelle" des phénomènes physiques, Chapman va, à partir du milieu des années 1920, adopter une attitude plus empathique et même admirative vis-à-vis de

[47] Ses travaux sur le magnétisme terrestre lui vaudront de nombreuses récompenses, la première étant l'"Adams Prize' de l'Université de Cambridge, à la fin des années 1920. Ils seront synthétisés dans l'ouvrage en deux volumes *Geomagnetism*, publié en 1940.

[48] Chapman rédigera un tiers de l'ouvrage de référence *The Mathematical Theory of Non-Uniform Gases* (1970), dans lequel il introduira la notion de « diffusion (ou conduction) thermique ("thermal diffusion") » [Grachev & Severinghaus, 2003].

scientifiques de l'atmosphère plus "empiristes" (dans son allocution de Président de la 'Royal Meteorological Society' de janvier 1934, il rendra hommage au « talent incroyable des physiciens expérimentateurs » chargés de mesurer l'ozone atmosphérique [Chapman, 1934, p. 133]), et va se consacrer presque exclusivement à l'étude des phénomènes de la haute atmosphère. Déjà, ses travaux théoriques sur la cinétique des gaz restaient dans son esprit indissociables de "l'atmosphère réelle" (si bien qu'il avait cherché « dès le début à construire une solution approximative » au problème posé par la cinétique des gaz de la haute atmosphère, rapporte T.G. Cowling, qui produira avec lui un long ouvrage intitulé *The Mathematical Theory of Non-Uniform Gases* (1953) [Cowling, 1968, « the Kinetic Theory of Gases » **in** Akasofu *et al.*, 1968]).

Ensuite, ses travaux sur les aurores polaires et les tempêtes magnétiques avaient confronté Chapman à des spécialistes de la haute atmosphère comme F. Lindemann (qui critiquèrent parfois ses travaux)[49]. Qualifiés à l'époque de « météorologiques », les travaux que Chapman mène alors sur la composition et la dynamique de la haute atmosphère posent trois questions : quels sont les mécanismes de diffusion dans l'atmosphère ? ; comment décrire les « oscillations atmosphériques » dont les « périodiques oscillations atmosphériques globales » (en anglais, "atmospheric tides") ? ; quelles (photo-)dissociations expliquent la composition de la haute atmosphère – et, en particulier : peut-on élaborer une photochimie de l'oxygène et de l'ozone atmosphérique ?

L'idée d'élaborer une théorie chimique de l'ozone se trouve à la rencontre de deux types de travaux. D'une part, les études spectroscopiques de Dobson, Lindemann ou Götz sur la composition de la haute atmosphère, et en particulier sur la quantité « anormale » d'ozone dans la stratosphère (par rapport à la troposphère) [Chapman, 1931, p. 353]. D'autre part, les propres développements de Chapman sur la théorie cinétique des gaz, qui l'ont amené à modéliser « la composition, l'ionisation et la viscosité de l'atmosphère à haute altitude », dès 1920, avec le concours de son assistant E.A Milne. Au tournant des années 1930, Chapman et Milne ne sont pas en mesure d'affirmer que la stratosphère contient de l'hydrogène libre, à l'image de l'ionosphère. En revanche, ils savent qu'elle contient de l'oxygène libre (O), ainsi

[49] L'un des biographes de Chapman, Ferraro, raconte :
"Lindemann in 1919 criticized Chapman's numerical development of [his] theory [(which ascribed the origin of magnetic storms to the action of a stream of charged particles from the sun)] chiefly on the grounds that it involved an accumulation of charge on the earth's atmosphere which would, by electrostatic repulsion, prevent the supposed continued entry of further charges. Lindemann added to his criticism a suggestion that Chapman's atmospheric theory might be preserved in substance if the supposed stream of charged particles, mainly of one sign, were replaced by a neutral but ionized stream. Lindemann suggested how such a stream might be emitted from the sun by the action of radiation pressure on the atoms and ions, and might travel to the earth, without appreciable recombination, with a velocity of about 800 km/sec." [Ferraro VCA, 1968, « the birth of a theory [on magnetism] » **in** Akasofu *et al.*, 1968]

que deux molécules composées de plusieurs atomes d'oxygène, le dioxygène (O_2) et l'ozone (O_3), en quantité importante. *C'est pour expliquer la stabilité chimique de ces composés oxygénés dans la stratosphère que Chapman va proposer un schème réactif de nature inédite en sciences de l'atmosphère*.

En 1929, Chapman présente son schème de production photochimique de l'ozone, lors d'une conférence sur l'ozone qui se tient à Paris. Une publication suit l'année suivante, dans les *Memoirs of the Royal Meteorological Society*, sous le titre "a Theory of Upper Atmospheric Ozone" (1930), puis le schème est reproduit de nouveau en 1931, au sein d'un article sur « quelques phénomènes de la haute atmosphère », dans les *Proceedings of the Royal Society of London, Series A* (Chapman, 1931, "the ozone layer", pp. 358-360).

L'hypothèse d'une corrélation entre présence importante d'ozone dans la stratosphère et filtration des UV est suggérée par la méthode même de mesure de l'ozone, la spectroscopie UV (voir section suivante). Mais, de nombreux écueils se dressent. D'une part, la détermination de la distribution verticale de l'ozone en est à ses débuts. Dans ses communications de 1929-1931, Chapman prend pour altitude de la couche d'ozone 50 km (valeur de Cabannes et Dufay) ; puis, dans l'article de 1934, il se fie aux récentes mesures de Dobson, Götz et Meetham réalisées à Arosa en 1932 (voir plus haut), qui la situent à 20-22km environ. De plus, si les UV interagissent avec les composés oxygénés tels que l'ozone, il faut alors connaître les paramètres radiatifs exacts permettant la dissociation et la recombinaison de molécules O_1, O_2 et O_3. Chapman doit par conséquent s'essayer à un choix de « coefficients [de réaction chimique], partiellement basé sur le fait empirique qu'aucune variation diurne n'a été observée dans la colonne d'ozone », relatent ses anciens collègues et biographes de circonstance Haurwitz et Fogle. Il apparaît, de fait, à la lecture du texte autobiographique de G. Dobson, que les « preuves de variation diurne significative de la quantité d'ozone dans l'atmosphère » n'avaient toujours pas été réunies à la fin des années 1930 (elles le seraient peu après). Enfin, bien que supposant que le transport d'ozone soit potentiellement important, les données empiriques sont alors trop maigres pour prendre cet aspect en compte. [Chapman, 1931, p. 353 ; Dobson, 1968, p. 395-396 ; Chapman, 1934, p. 130 ; Haurwitz & Fogle, 1968 **in** Akasofu *et al.*, 1968 ; Dobson, 1968, p. 397]

En définitive, Chapman s'essaie à une théorisation de la destruction / régénération de l'ozone dans la stratosphère, à une époque où de nombreux paramètres qu'il invoque ne sont guère quantifiables. Ce "cycle" chimique est, de fait, jugé par les expérimentateurs comme inefficace pour rendre compte des concentrations en ozone stratosphérique. Dans son article autobiographique d'une vingtaine de pages, G. Dobson ne mentionne même jamais les travaux de S. Chapman [Dobson, 1968]. Pourtant, ceux-ci constituent la première tentative de construction théorique d'une chimie complexe de l'atmosphère, et lancent ainsi un défi

théorique et empirique à toute la communauté de l'ozone. De plus, comme nous le verrons dans les chapitres suivants, ce cycle sera conservé par les successeurs de Chapman, pour être simplement "étoffé" (c'est-à-dire qu'il sera conservé tel quel au cœur d'une chimie de l'ozone plus complexe).

La théorie chimique pensée par Chapman pour expliquer l'équilibre des concentrations d'ozone dans la stratosphère fait intervenir les rayonnements solaires – on parle de *photochimie*. Il faut en effet expliquer *dans le même temps* l'absorption des UV solaires par la stratosphère et la présence importante d'ozone dans la stratosphère. En outre, cette théorie repose *sur une analogie faite avec la haute atmosphère*, et pour laquelle il a été établi que se produisaient des réactions de dissociations des composés O_x, par *ionisation*. De la même manière que des radiations incidentes peuvent être « absorbées » dans les « deux couches ionisées » tout en dissociant des composés O_x (par ionisation, donc), l'ozone stratosphérique sera dissocié par d'autres radiations (de plus grandes longueurs d'onde), selon un mécanisme, non d'ionisation (ou plus exactement de photo-ionisation), mais de *photochimie* (voir Figure 7 ci-dessous)[50] :

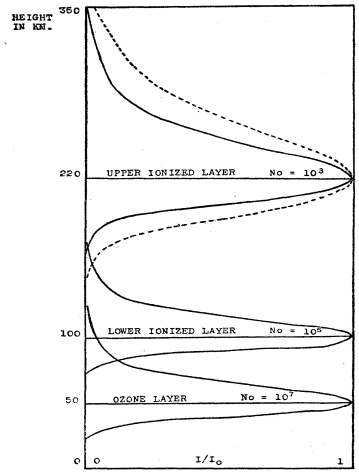


Figure 7 : Couches atmosphériques ionisées, selon S. Chapman (1931). En abscisse, le rapport de l'intensité de la lumière incidente sur la lumière

"Some of the radiations absorbed in the ozone and ionised layers dissociate the absorbing gas, the radiation in the Hartley band (about 2200-3400 A. [Å]) dissociates ozone, a band of still shorter wave-length dissociates molecular oxygen, while the unknown radiations absorbed in the two ionised layers produce

[50] Les phénomènes de photo-ionisation et de photochimie ont une même origine radiative : alors que les réactions photochimiques se réalisent avec un apport d'énergie de rayonnements visibles ou de longueurs d'onde proches de celles du spectre visible (dont les UV), la photo-ionisation des molécules atmosphériques est également provoquée par des rayonnements UV (de courte longueur d'onde).

Au début des années 1940, les autres causes avancées pour expliquer l'ionisation des atomes et molécules de la haute atmosphère étaient : « le bombardement corpusculaire » (responsable des aurores) ; « aux basses altitudes (jusqu'à 1.500 m), l'émanation » (par « émanation », on entend « l'ensemble des émanations du radium, du thorium et de l'actinium, dosé par ses propriétés radioactives ») ; « les rayons cosmiques dont le pouvoir ionisant, considérable, croît lorsqu'on s'élève ». Enfin, écrivent Barbier et Chalonge, « en frottant les unes sur les autres, des masses d'air contenant des poussières peuvent aussi s'ioniser ». [Barbier & Chalonge, 1942, p. 64 & 41]

transmise en dessous ; en ordonnée, l'altitude en kilomètre [Chapman, 1931, p. 356]	the particular form of dissociation called ionisation." [Chapman, 1931, pp. 356-357][51]

Enoncée en 1929 par Chapman, la théorie se présente sous la forme de quatre « équations et recombinaisons », devant décrire un *équilibre* des concentrations d'ozone stratosphérique, où sa destruction photochimique serait contrebalancée par sa régénération :

$2O = O_2$ $O + O_2 = O_3$ $O + O_3 = 2O_2$ $2O_3 = 3O_2$

[Chapman, 1931, p. 358][52]

Puisque cette « première interprétation de la distribution et de la variation temporelle de l'ozone » cherche à décrire un équilibre, cette succession d'équations forme un *cycle* de réactions chimiques, qui semble avoir été le premier à être élaboré pour l'atmosphère. [Haurwitz & Fogle, 1968 **in** Akasofu *et al.*, 1968]

L'atmosphère devenait chimiquement réactive puisque, avec le schème de Chapman, les phénomènes qui s'y produisaient à l'échelle de l'atome n'étaient plus uniquement des phénomènes électroniques donc physiques (par exemple, des ionisations : $X \rightarrow X^+ + e^-$), mais faisaient intervenir des réactions chimiques (il s'agit, par définition, de transformations d'une ou de plusieurs espèces chimiques en d'autres espèces chimiques, du fait de l'apparition ou de la disparition d'au moins une liaison chimique ou d'un échange d'électrons). Toutefois, la chimie du physicien-mathématicien Chapman demeurait simple, puisqu'elle se limitait à des dissociations et recompositions moléculaires transformant des agrégats d'atomes d'oxygènes en d'autres agrégats de même nature, sans que ne s'effectuent

---

[51] En fait, c'étaient en premier lieu les phénomènes de la haute atmosphère – donc d'ionisation – qui intéressaient Chapman. La possibilité d'une « dissociation » photochimique de l'ozone stratosphérique allait permettre à Chapman de proposer l'hypothèse selon laquelle les couches supérieures de l'atmosphère étaient beaucoup plus ionisées qu'on ne le pensait (et ceci sous l'action de l'atome oxygène libre O) :

> "The ozone layer has been briefly discussed here mainly because the existence of atomic oxygen in the upper levels may be of importance in connection with the theory of the ionised layers." The "observed value is definitely greater than could be explained by molecular nitrogen and oxygen in the absence of atomic oxygen, unless the intensity of the ultra-violet solar radiation is greater than has been assumed." [Chapman, 1931, pp. 360 & 365]
>
> The "theoretical interpretation of the distribution and time variation of ozone […] set the pattern for later work, quickly leading [Chapman] to the prediction that in the ionosphere the oxygen is largely dissociated, a conception then entirely novel." [Haurwitz & Fogle, 1968 **in** Akasofu *et al.*, 1968]

[52] La théorie de destruction / régénération de l'ozone de Chapman peut être résumée de la sorte :

(1) Des rayons UV solaires incidents dissocient le dioxygène stratosphérique :

$$O_2 + h\nu \text{ (rayons UV)} \rightarrow O + O$$

(2) L'oxygène formé se combine avec le dioxygène restant pour former de l'ozone :

$$O + O_2 \rightarrow O_3$$

(3) Ensuite, d'autres mécanismes simples, faisant intervenir ou non les rayons UV solaires, décomposent l'ozone pour reformer du dioxygène et de l'oxygène. Ainsi se trouve expliqué l'équilibre des concentrations d'ozone stratosphérique observées (d'une année sur l'autre, et en un lieu donné).

de reconfigurations moléculaires avec des atomes différents – comme c'est le cas par contre dans l'exemple suivant : $AB + C \rightarrow AC + B$… et comme s'y essaieront les aéronomes des années 1960.

L'intrication *ab ovo* des concentrations en ozone stratosphérique et des rayonnements UV

Dans la première moitié du XX^{ème} siècle, les techniques qu'utilisent les astronomes afin de détecter des particules ionisées dans la haute atmosphère sont multiples.[53] La spectrométrie des rayons incidents réalisée au sol est toutefois la plus courante. La spectrométrie d'un gaz repose sur la correspondance entre les concentrations de ce gaz et la nature du spectre électromagnétique recueilli une fois qu'un rayonnement a traversé ce gaz. Le rayonnement résultant est appelé "signature spectrale" du gaz. Le gaz étudié a altéré le rayonnement incident. Ainsi, dans le cas de la spectrométrie de l'ozone, par exemple, *l'ozone est quantifié "indirectement", en mesurant son action sur le spectre solaire*.

Un instrument de mesures est certes indissociable de pratiques (calibrage et conditions d'utilisation, nettoyage, discipline du corps dans la pratique de l'instrument, *etc.*). Mais, le fonctionnement de l'instrument obéit également à une ou des lois scientifiques, donc à une épistémologie, qui "s'incarne" dans l'instrument. Gaston Bachelard parlait des instruments scientifiques comme de « théories matérialisées » (Exemple : « On voit la température sur un thermomètre ; on ne la sent pas. Sans théorie [(par exemple, la loi de dilatation du mercure en fonction de l'apport calorifique)], on ne saurait jamais si ce qu'on voit et ce qu'on sent correspondent au même phénomène » [Bachelard, 1940, p. 10]). Ici, *le spectrophotomètre constitue une théorie matérialisée de l'absorption de l'UV par les gaz*. Et, le spectromètre est paramétré de telle manière qu'il doit être ajusté à l'objectif de la recherche : ici, détecter la partie manquante du spectre solaire, confisquée par l'ozone atmosphérique. A partir des années 1910, *le spectrophotomètre a définitivement lié épistémologiquement ozone stratosphérique et rayonnements UV solaires* : le fonctionnement même de l'appareil repose sur le filtrage des UV qu'opère l'ozone, et dont résulte le spectre d'identification de l'ozone. Le spectrophotomètre à ozone lie *épistémologiquement* mesures des radiations solaires et mesures d'un gaz, l'ozone

[53] Il peut s'agir de mesures *in situ* de conductivité à bord des ballons tel *Explorer II*, ou, plus souvent, de sondages verticaux par télédétection qui utilisent, non les rayonnements incidents, mais des signaux artificiellement produits, de longueurs d'onde qui sont donc indépendantes de celles qui réalisent les réactions physiques ou chimiques dans l'atmosphère. Par exemple, un poste émetteur lance des signaux de « longueur d'onde inférieure à 150 mètres » ; d'après les enregistrements de fréquences réalisés par l'« oscillographe cathodique » du poste récepteur, on détermine, « de proche en proche, comment le nombre d'électrons par centimètre cube évolue avec l'altitude » [Barbier & Chalonge, 1942, pp. 63-71]. Plus tard, les RADARS et des LIDARS renouvelleront les mesures d'ozone de ce type.

(qui était auparavant mesuré dans l'atmosphère à l'aide d'instruments basés sur des procédés chimiques).[54]

Sur un plan *sociologique*, à présent, les pratiques de *spectrométrie de l'ozone* telles que les conçoit S. Chapman *couplent plusieurs pratiques disciplinaires scientifiques*. D'abord, les analyses spectrales de l'atmosphère (ou *spectrométrie de l'atmosphère*) qui se déclinent à partir de la fin du XIX^{ème} siècle rencontrent avec Chapman la *photochimie en phase gazeuse*. En fait, les développements de la spectroscopie sont liés à ceux de la photographie, eux-mêmes liés à ceux de la photochimie des gaz, et ceci depuis le début du XIX^{ème} siècle. Mais, les photochimies en phases gazeuse et liquide deviennent des enjeux de recherche importants seulement dans les années 1920.[55]

C'est au cours de cette décennie que Chapman émet l'hypothèse d'une réaction photochimique des gaz oxygénés dans la stratosphère, mais il ne semble pas que l'essor de la photochimie des gaz ait été un facteur déclencheur dans la genèse de la théorie de Chapman. Il faut plutôt invoquer les expérimentations nombreuses sur des phénomènes électromagnétiques et sur la nature (corpusculaire et) ondulatoire de la lumière, dont le

---

[54] Cette dépendance épistémologique entre radiations (solaires UV) et ozone (dont sa réactivité chimique) s'incarna même sur le plan institutionnel, quelques décennies plus tard, lors de l'"International Radiation Commission Session' d'Oxford, en juillet 1959. Cette rencontre, co-organisée par l'"International Radiation Commission' et l'"International Ozone Commission' (deux commissions de l'IAMAS ('International Association of Meteorology and Atmospheric Sciences' ; ICSU), réunit en effet des figures spécialisées dans le bilan radiatif terrestre (Marcel Migeotte, John T. Houghton (qui signera beaucoup plus tard un retentissant article "Global warming is now a weapon of mass destruction" dans le *Guardian* du 28 juillet 2003, puis sera nobélisé en 2007 avec ses collègues du GIEC)) et des chercheurs plus spécifiquement focalisés sur les questions d'ozone stratosphérique (G. Dobson, J. Farman, Alan W. Brewer) (voir Chapitre 5).

[55] Au tournant du XIX^{ème} siècle, des « rayons de chaleur » (ou « rayons calorifiques ») ont été identifiés « au-delà » des rayons rouges, à l'aide d'un prisme (Ex : l'expérience de William Herschel (1738-1822) vers 1800). (A la fin du XIX^{ème} siècle, les ondes radio seront produites en laboratoire au-delà de l'infrarouge, alors que les premières ondes radio solaires ne seront détectées qu'en 1942.) Toujours à l'aide d'un prisme (et grâce à une solution de chlorure d'argent), des « rayons dits chimiques » sont identifiés dans la région opposée du spectre solaire, au-delà du bleu (Ex : travaux de Johann W. Ritter (1776-1810) entre 1801 et 1803).

Le début du XIX^{ème} siècle voit le développement de technologies devant décomposer l'ensemble du spectre solaire, dont les rayons au-delà du violet. La substance chimique révélatrice la plus utilisée est l'argent (chlorure d'argent, métal argent). Les astronomes s'emparent précocement de ces technologies (daguerréotype, photographie). « Le premier daguerréotype d'un objet astronomique, la Lune, fut obtenu en 1840 par John William Draper (1811-1882), après vingt minutes d'exposition. » Comme en témoigne l'utilisation précoce du composé chimique chlorure d'argent pour la détection des ultraviolets, UV et chimie sont désormais liés épistémologiquement dans l'explication de certains phénomènes. Ce n'est pas un hasard si J.W. Draper, à qui l'on doit le premier daguerréotype d'un objet astronomique (la Lune, en 1840), est également désigné comme l'un des premiers contributeurs à l'histoire de la *photochimie*. Entre 1820 et 1843, ses travaux et ceux de T. von Grotthus montrent qu'une réaction chimique peut être catalysée par des "rayons chimiques" (*i.e.* des rayons UV), si ces derniers sont absorbés par la substance chimique réactive. De même que l'on avait imaginé des écrans d'impression des UV, on réalise bientôt des filtres à UV translucides [Vázquez M. & Hanslmeier A., 2006, pp. 2-6].

Néanmoins, il s'agissait là encore de substances solides. Les photochimies des gaz et des solutions liquides ("gas-phase photochemistry" & "solution photochemistry") ne se développèrent guère dans les laboratoires avant le début du XX^{ème} siècle. Ainsi, la spectroscopie UV dans l'atmosphère (par exemple, celle qui associe, selon Hartley (1880), la coupure spectrale dans l'UV (à 293 nm) à la présence d'ozone dans l'atmosphère), se fit certes sur la base d'études préalables en laboratoire, mais ne relevait pas de la photochimie, en tant qu'elle ne théorisait pas une affectation chimique de l'ozone subséquente à sa rencontre avec les rayons UV. Bien qu'en plein essor, la jeune tradition d'étude de la photochimie des gaz en laboratoire était encore embryonnaire dans les années 1920 [Roth, 2001, p. 397].

début du XX^{ème} siècle est le théâtre. La *spectroscopie* participe à ce programme de recherche, ce qu'elle fait en partie par le bais de l'étude du cosmos et de la composition atmosphérique. En retour, l'atmosphère est sondée par les mesures spectroscopiques. C'est dans cette tradition que Chapman s'insère bien sûr lorsqu'il publie ses articles entre 1930 et 1934. Il y présente son schème de réactions photochimiques de l'ozone atmosphérique comme une contribution au seul champ, jusqu'alors très empirique, des études astronomiques et météorologiques sur l'ozone stratosphérique. [Chapman, 1931 ; Chapman, 1934]

En définitive, le cycle photochimique de Chapman opère la rencontre de ce champ d'études empiriques sur l'ozone stratosphérique (lui-même situé dans une *tradition de cartographie de l'ozone atmosphérique*), avec trois autres traditions auxquelles Chapman s'est intéressé dès le début de sa carrière :

1. le *travail des astronomes sur les dissociations dans la haute atmosphère*, programme de recherche que Chapman avait d'abord vu comme une étude de cas pour élaborer sa théorie cinétique des gaz (non uniformes) [Cowling, Haurwitz & Fogle, 1968 **in** Akasofu *et al.*, 1968] ;
2. la *photochimie en phase gazeuse*. Dans le cas de Chapman, il faut plus y voir une "application", une "exportation" *ad hoc* de la photochimie en phase gazeuse dans l'atmosphère, que quelque coopération de Chapman avec les rares photochimistes de laboratoire de l'époque (qu'il ne cite pas ; Chapman utilise uniquement les données de laboratoire donnant des valeurs des coefficients d'absorption des rayonnements par les gaz [Chapman, 1931 ; Chapman, 1934]). Les biographes de Chapman n'ont pas donné d'indication sur d'éventuelles collaborations de ce type. Il n'est pas impossible que des travaux de laboratoire sur la photochimie de l'ozone "dans les conditions physiques de la stratosphère" aient été entrepris à l'époque. Mais alors, pourquoi, dans ce cas, Chapman ne les évoquerait-il pas ? En tout cas, ce dernier utilise des valeurs de constantes de réaction très "théoriques", calculées d'après des lois universelles de la physico-chimie (*cf.* Chapman, 1931, pp. 358-360).
3. une *théorie optique de l'instrument spectrophotométrique*, conçue de telle manière que les bandes spectrales caractéristiques de l'ozone correspondent à un signal ((photo)graphique, à l'époque) – *cf.* les instruments et méthodes de Dobson, de Götz.

Par l'interprétation que Chapman fait des mesures spectrométriques – la pérennité des concentrations d'ozone stratosphérique s'explique par une succession de réactions photochimiques –, les mesures spectrophotométriques de concentrations d'ozone

stratosphérique lient à présent quatre disciplines et communautés scientifiques : l'optique des physiciens de laboratoire, la théorie de la dissociation des gaz dans la haute atmosphère des astronomes, la photochimie des gaz des chimistes de laboratoire et les mesures systématiques d'ozone des astronomes et météorologistes. Quant au programme de théorisation de la chimie de l'atmosphère, elle va en retour pouvoir alimenter la tradition de mesures spectrométriques de l'ozone en questionnements, ainsi que, potentiellement, les quatre autres traditions auxquelles elle est par définition liée épistémologiquement.

En tant qu'elle contribue à faire se rencontrer différentes disciplines scientifiques, on pourrait qualifier la spectrométrie de l'ozone d'*« objet frontière »*. Cependant, dans la littérature STS ou sociologique qui utilise ce terme, l'objet frontière s'applique souvent à des concepts ou à des outils théoriques, voire – plus rarement et dans une littérature plus récente – à des instruments autour desquels s'agrègent des chercheurs aux pratiques habituellement éloignées, plutôt qu'à des programmes de recherche scientifique agrégeant des chercheurs de manière durable. L'objet frontière, écrivent les introducteurs de la notion Susan Star et James Griesemer, désigne « un objet à la fois assez plastique pour s'adapter aux besoins locaux, et qui contraindrait suffisamment les différentes parties qui l'emploient pour maintenir une identité commune entre leurs sites », et non le lieu de changements pérennes de paradigmes épistémologiques et de communautés de chercheurs, comme ce qui se joue dans le cadre de la création de la photochimie [Star & Griesemer, 1989].[56]

La notion de « zone d'échange » ("trading zone") entre scientifiques issus de « champs » scientifiques différents, introduite par Peter Galison dans *Image & Logic*, s'applique mieux à notre spectroscopie de l'ozone du début du XX^{ème} siècle. D'abord, la spectroscopie de l'ozone induit des changements durables de pratiques expérimentales et théoriques dans différents champs scientifiques (elle contribue même à créer un nouveau champ, la photochimie de l'ozone). Ensuite, dans l'étude de cas de P. Galison, la « physique de la condensation » ("condensation physics"), qu'il désigne comme « zone d'échange »

[56] Dans la littérature anglo-saxonne, le concept de *"boundary objects"* n'est pas sans faire écho au *"boundary work"* de Gieryn Thomas (Thomas G., 1983, "Boundary-work and the demarcation of science from non-science: strains and interests in professional ideologies of scientists"). La définition primitive de S.L. Star (1989) donnée ci-dessus légitime usuellement l'emploi du terme « objet frontière », fréquemment rencontré dans le champ des STS. Par exemple, les auteurs de l'article "Science and policy in air pollution abatement strategies" sur la gouvernance des pluies acides, Sundqvist, Letell et Lidskog, du département de *Science and Technology Studies* de l'Université de Göteborg, appellent « objets frontières », aussi bien le concept de « charges critiques » (un seuil limite des impacts des pollutions acides) que le modèle numérique RAINS, développés tous deux par le « régime LRTAP » (*i.e.* le régime lié à la gouvernance européenne des pluies acides) [Sundqvist *et al.*, 2002]. Les modèles numériques, ou les paramétrisations utilisées par les modélisateurs (*cf.* Sundberg, 2007), sont fréquemment qualifiés d'objets frontières, dans la mesure où se fédèrent souvent autour d'eux plusieurs communautés disciplinaires.

Dans ce rapport de thèse, nous n'utiliserons pas ce concept d'« objet frontière », moins pertinent pour l'historien, qui cherche à identifier des tendances plus durables que les presque permanents points de jonction (matériels, théoriques, discursifs) opérés entre les communautés constituées (points de jonction entre disciplines et communautés, que l'on rencontre de manière presque permanente dans toute entreprise d'étude sociale des sciences), *i.e.* que les « objets frontières ».

entre la « météorologie morphologique » et la « théorie réductionniste de la matière » ("analytic matter theory"), s'incarne dans une pratique instrumentale (la physique de la condensation de la chambre à brouillard de Charles Wilson entre 1895 et 1910), de sorte que l'on peut y voir un cas analogue au nôtre, pour lequel une pratique instrumentale, la spectrophotométrie, suscite des réunions entre scientifiques issus de disciplines différentes, en lien avec une pratique expérimentale nouvelle.[57]

Pour S. Chapman, G. Dobson et leurs collègues spécialistes de l'ozone, la spectrométrie de l'ozone va à présent se présenter comme une « zone d'échange » entre « théorie optique de la spectrophotométrie », « cartographie de l'ozone atmosphérique », « théorie des gaz ionisés dans la haute atmosphère », « photochimie en phase gazeuse », mais aussi « bilan radiatif global », « théorie de l'équilibre photochimique de la moyenne atmosphère »... voire d'autres disciplines que nous n'avons pas identifiées (traits pleins sur le schéma ci-dessous, notre Figure 8). De plus, la théorie de l'équilibre photochimique de la moyenne atmosphère est née de l'échange entre les quatre premiers champs d'étude, au sein du programme de recherche constitué par la spectrométrie de l'ozone, dans lequel s'inscrit explicitement Chapman (flèches en pointillés).[58]

[57] C'est même précisément parce qu'il se vante d'avoir su mettre les pratiques instrumentales au cœur de son récit historique sur les hybridations entre disciplines, que Peter Galison trouve légitime d'introduire le concept « de zone d'échange », une notion qui dépasserait et engloberait celle « d'objet frontière » :

> "In working out the idea of a trading zone, I have benefited enormously from the work of anthropological linguists, who have incorporated into anthropology a sophisticated taxonomy of pidgins and creoles and an analysis of the development and uses to which these tongues have been put. […]
>
> "Of all the literature on scientific exchange, with respect to the notion of the trading zone I find most congenial the work of Star and Griesemer's "Translations' and Boundary Objects", *Soc. Stud. Sci.* 19 (1989): 387-420, where they use the history of ecology to show how certain objects (such as fossils) could participate simultaneously in the different "views" held by collectors, trappers, administrators, and others – and yet have some element of continuous identity. The notion of cooperation through heterogeneity is key for their project and mine. As I will argue below, however, I urge first that we drop the notion of "translation" and replace it by the establishment of local exchange languages. Second, as the term "trade language" suggests, more can be shared between languages than the nouns designating specific objects: we will frequently be concerned in the context of experimentation with locally shared *procedures* and *interpretations* as well as objects." [Galison, 1997, p. 47]

[58] Dans *Image & Logic* de Galison, en revanche, la zone d'échange « physique de la condensation » n'est pas l'unique programme de recherche qui mena aux premiers développements de la « physique météorologique », de la « climatologie », de la « physique de la condensation pour moteurs à vapeur » et de la « théorie de la matière particulaire »… contrairement à ce que semble indiquer le diagramme ci-dessous tiré d'*Image & Logic*, et schématise le rôle de « zone d'échange » joué par la « physique de la condensation » entre 1895 et 1911 :

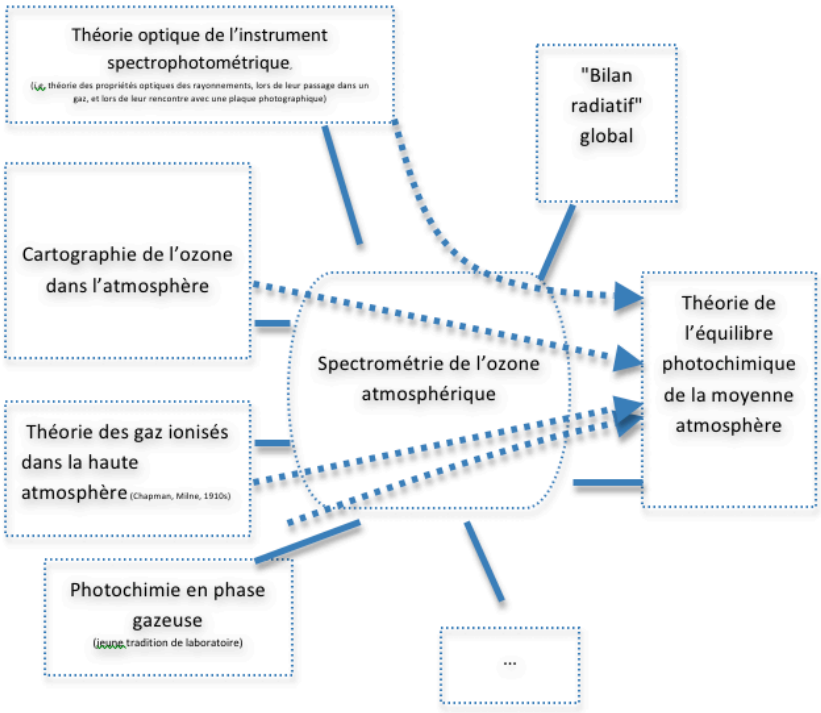


Figure 8 : La *spectrométrie de l'ozone atmosphérique* comme « zone d'échange » entre disciplines (celles reliées par des traits pleins), à partir de 1929 ; et, par ailleurs, comme pratique instrumentale médiatrice, qui tira parti de champs constitués pour donner naissance à la théorie de l'équilibre photochimique de la moyenne atmosphère (flèches en pointillés, qui suivent la flèche du temps)

La proposition d'ingénierie atmosphérique de Chapman : « faire un trou dans la couche d'ozone »

Dans l'esprit des astronomes, qui plus est dans un monde sans satellite artificiel, l'observation du ciel et la connaissance de l'atmosphère sont inextricablement liées. Depuis le XVIII[ème] siècle, elles constituent les deux tâches centrales de l'astronomie. S. Chapman, lui-même, pensa sa formalisation des photodissociations dans la moyenne et haute atmosphère, non seulement comme une contribution à la météorologie (dont attestent par exemple ses

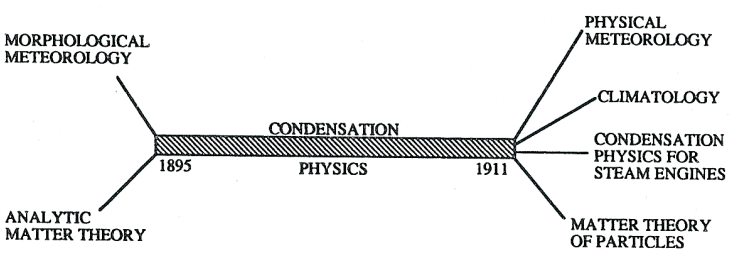


Figure 9 : « Création et désintégration de la physique de la condensation ("condensation physics") », que l'historien des sciences Peter Galison qualifia de « zone d'échange » entre les autres champs disciplinaires cités (à gauche et à droite) [Galison, 1997, « Figure 2.27 », p. 136]

interactions avec le météorologiste Frederick Lindemann), mais également comme une recherche de facteurs correctifs des observations de l'espace. En tant qu'ancien collaborateur de l'astronome Frank Dyson et responsable du nouvel observatoire de Greenwich, Chapman voit la haute atmosphère, à la fois comme la matrice de phénomènes atmosphériques spectaculaires, et comme un filtre qui "parasite" les observations de l'espace.

Quant à l'ozone stratosphérique en particulier, Chapman l'a envisagé comme se transformant *chimiquement* (sous l'effet des rayons UV). Lui vient alors l'idée d'agir *artificiellement, chimiquement* sur cet ozone, afin de faciliter les observations de l'espace. Lors de son allocution de Président de la 'Royal Meteorological Society', en janvier 1934, il expose très sérieusement, très scientifiquement les conditions de réalisation d'une inédite expérience d'"*ingénierie atmosphérique*" sur cette atmosphère nouvelle – chimiquement réactive – qu'il a lui-même contribué à faire naître : il propose de *faire un trou dans la couche d'ozone* (Chapman, 1934, "9. Can a hole be made in the ozone layer?").[59]

Depuis le XVIII[ème] siècle au moins, la détermination de "facteurs correctifs" inhérents à l'atmosphère constitue un enjeu manifeste pour les astronomes, dans les controverses sur les observations de l'espace. Regarder vers l'espace implique de connaître son propre milieu. D'abord réduits à des facteurs physiques, les corrections atmosphériques vont également prendre en compte la composition chimique de l'atmosphère, et surtout de la haute atmosphère, à partir de la fin du XIX[ème] siècle.[60] Cette nouvelle donne est indissociable des

[59] Le texte dont il est question est une retranscription (qui se veut aussi un texte scientifique référencé) de l'allocution présidentielle ("presidential address") de Chapman du 17 janvier 1934, devant la 'Royal Meteorological Society' britannique (créée en 1850), dans le *Quarterly Journal* de ladite institution. Le mandat de Chapman comme président courrait en fait sur les seules années 1932 et 1933, mais on se trouve là au tout début de l'année 1934, ce qui peut expliquer que ce soit encore lui qui prononce ce discours, sans doute pour la dernière fois.

[60] Avant le développement de la spectroscopie, l'observation du ciel à l'œil nu ou à l'aide de télescopes nécessitait déjà une connaissance de l'atmosphère, en vue de prendre en compte ses "brouillages" optiques. A l'heure des controverses sur les dimensions et la sphéricité de la Terre au XVIII[ème] siècle, les mesures de méridiens par triangulation étaient soumises à caution. Ce sont d'abord les "corrections" effectuées à l'aide des tables de Bradley sur l'aberration annuelle due à la rotation de la Terre autour du Soleil qui seront déterminantes (elles accroîtront encore les différences de longueur entre méridiens français et lapon qui avaient été mesurées). Outre cet effet relatif à la rotation des astres, viendront s'ajouter dans la controverse des effets atmosphériques, dont celui, majeur, de la dispersion atmosphérique (en astronomie, la " dispersion atmosphérique" désigne la dispersion chromatique de la lumière venue de l'espace dans l'atmosphère, à la manière d'un prisme – alors qu'en sciences de l'atmosphère, elle désigne l'évolution spatio-temporelle des panaches de pollution). [Terrall, 2002, pp. 130-137 ; Briday, 2007 (non publié), « La controverse sur la forme de la Terre au début du siècle des Lumières – des divers paradigmes et contributions », Master Histoire et Philosophie des Sciences, Paris VII]

Depuis la fin du XIX[ème] siècle, la haute atmosphère est pensée comme le lieu où les réactions d'ionisation et de dissociation deviennent prédominantes. De nombreuses caractéristiques étaient étudiées par les astronomes, dont un maximum devait être pris en compte, afin de soustraire des images ou du spectre "bruts" "de l'espace" le spectre ou les images "réelles" "de l'espace" : dispersion atmosphérique, géomagnétisme, électricité atmosphérique, conduction thermique, turbulences et dynamique à grande échelle, ionisation, filtrage spectrale des gaz atmosphériques ; seule cette dernière caractéristique nous importe dans cette section. (En outre, la haute atmosphère devenait un enjeu pour de nouvelles communautés, dont les ingénieurs qui participaient au programme de recherche sur les possibilités de communications offertes par la réflexion des ondes à hautes fréquences (HF) par l'ionosphère, lancé dans les années 1920.)

développements de la télédétection et de la spectroscopie. Les astronomes vont immédiatement décliner l'utilisation de ces techniques pour atteindre deux buts : expliquer des phénomènes spectaculaires se déroulant dans la haute atmosphère ; analyser des spectres lumineux provenant de l'espace (voire des planètes, avec parfois comme enjeu de déterminer la composition de leurs atmosphères). Dans le second cas, les astronomes se retrouvent de nouveau dans l'obligation de produire une connaissance sur la composition de l'atmosphère terrestre, dans le but de "corriger" les observations de l'espace.

Devant la complexification épistémologique de leur atmosphère et à défaut de posséder des appareils capables de voler au-dessus d'elle (appareils qui de toute façon n'offrent pas le même "confort" d'observation qu'au sol), l'un des objectifs des astronomes de l'entre-deux-guerres, qui ont à présent dans leurs mains des outils de sondage radiométrique, réside dans *la "suppression" (ou la "soustraction") chimique de l'atmosphère*. En particulier : la "suppression" des *moyenne et haute atmosphères* (puisque les gênes occasionnées par la troposphère sur les observations spatiales peuvent être grandement mitigées, en disposant les télescopes et spectromètres dans des régions très sèches et éloignées des sources de polluants (urbains, marins)).

"Supprimer" l'atmosphère signifie, pour la plupart des astronomes : "supprimer *épistémologiquement*" l'atmosphère – en calibrant les appareils et en ajoutant des facteurs correctifs lors des calculs. Sydney Chapman propose quant à lui de supprimer *matériellement* l'atmosphère, en réalisant un « trou » temporaire et local dans la couche d'ozone, afin de faciliter les observations astronomiques dans l'ultraviolet. Il déclare :

> « Si les astronomes pouvaient se rendre au-dessus de la couche d'ozone, leurs photographies pourraient se prolonger de quelques centaines d'Angströms plus loin dans l'ultra-violet. Mais, ils préféreraient certainement observer le spectre ultra-violet du soleil et des étoiles depuis le sol plutôt que d'un avion. Si un trou pouvait être fait dans la couche d'ozone, ils seraient capables, depuis le sol, de photographier ces centaines d'Angströms supplémentaires. Par « faire un trou dans la couche d'ozone », je veux dire : supprimer tout, ou une grande partie, de l'ozone de la colonne d'air dans des régions sélectionnées. [...]
>
> « Supposons le trou effectué, combien de temps la reformation de l'ozone prendrait-elle par le biais des procédés normaux de production d'ozone, en mettant de côté le transfert dynamique de l'ozone qui avoisinerait le trou ? Cette question demande une connaissance des facteurs qui gouvernent l'équilibre de l'ozone atmosphérique. Si, comme je le crois, la lumière solaire est l'acteur principal dans la formation de l'ozone, il semble plus approprié de faire le trou au coucher du soleil, ou à un horaire proche ; après quoi, tout au long de la nuit, peu d'ozone, ou pas du

> tout d'ozone, ne se formerait dans le trou avant l'aurore. Puis, au lever du soleil, l'oxygène moléculaire se dissocierait de nouveau en atomes, et l'ozone commencerait à se reformer. Si le procédé était incontrôlé du fait d'un excès de déozoniseur, la quantité normale d'ozone serait recouvrée selon toute vraisemblance après une période que j'estime n'être pas inférieure à une semaine. » [Chapman, 1934, pp. 133-135]

A la lecture des deux pages et demi de la section "9. Can a hole be made in the ozone layer?" de la communication de Sydney Chapman de 1934, on peut sentir le plaisir que prend le scientifique comme le "démiurge de circonstance" à imaginer ce projet de "modification volontaire de l'atmosphère" (ou "ingénierie de l'atmosphère"), en appréciant les différents paramètres physico-chimiques qu'il juge centraux. Chapman n'avait-il pas passé les quatre dernières années à s'ingénier à élaborer des hypothèses sur les dissociations physico-chimiques des atomes et molécules de la moyenne et de la haute atmosphère ?

Outre le plaisir scientifique et démiurgique offert par les expériences de pensée d'ingénierie de l'atmosphère, et particulièrement frappant à la lecture de la seconde partie de la citation reproduite ci-dessus, ces "projets d'ingénierie" sont souvent liées chez leurs auteurs à une ferveur pour les nouvelles technologies – ce qui explique que, la plupart du temps, ces projets, même s'ils étaient rendus possibles politiquement, ne seraient pas aisément réalisables, voire irréalisables dans le contexte technologique existant.[61] S. Chapman, optimiste, juge son projet « pas totalement impossible ». Après avoir rappelé avec enthousiasme les possibles ouverts par l'aviation et la photographie, il fait part de son espoir que les chimistes puissent rapidement élaborer un « déozoniseur » qui posséderait toutes les propriétés souhaitées – « beaucoup dépendrait de la mise à disposition d'un déozoniseur approprié », souligne-t-il. [Chapman, 1934, pp. 132-135]

Saura-t-on jamais si le projet "chirurgical" de « trou » très localisé (d'une trentaine de kilomètres de diamètre) et très éphémère (d'une heure à une nuit entière) sur « toute » « ou presque toute » la colonne d'ozone est réalisable techniquement… En tout cas, il semble que la proposition de Chapman ne trouva aucun relai. Ni chez les astronomes, ni chez les

[61] Dans ses travaux sur les « géoingénieurs » ou autres « faiseurs de pluie » du XX^{ème} siècle, James Fleming a moqué les résultats des quelques, rares, technologies d'ingénierie atmosphérique effectivement déployées depuis les années 1940. Au mieux étaient-elles parvenues à disperser le brouillard autour d'une piste d'aviation militaire, ou à modifier faiblement des précipitations de manière non reproductible [Fleming, 2007(a) ; Fleming, 2010]. Toutefois, précisons-nous, les facteurs sociaux et politiques sont tout aussi déterminants, voire plus déterminants, pour expliquer les régulières périodes de désenchantement au sujet des techniques d'ingénierie atmosphérique et climatique depuis un siècle (comme nous le soulignons dans notre article Briday, 2014). En outre, de nombreuses propositions d'ingénierie atmosphérique, et une majorité de propositions d'ingénierie planétaire étrangères au contrebalancement du changement climatique, se présentent comme de simples "expériences de pensée", nullement destinées à initier un projet ingénierique.

ingénieurs-chimistes qu'il sollicitait pour développer quelque « déozoniseur approprié ». Au tournant des années 1960, Harry Wexler fera référence à l'article de Chapman, lorsqu'il mettra en garde contre la capacité des deux grandes puissances mondiales ennemies à déployer des technologies pouvant détruire massivement la couche d'ozone, et donc à modifier le climat à grande échelle à des fins belliqueuses (voir Chapitre 2). Par contre, nous n'avons pas trouvé de références à l'article de Chapman dans la littérature des sciences de l'atmosphère des années 1930-40.

Le discours de Chapman mérite néanmoins d'être analysé plus avant, car il contient *divers éléments que l'on retrouvera associés à d'autres propositions d'ingénierie de l'atmosphère, globale ou non*, par la suite :

- *Une analyse des risques environnementaux et sanitaires* – ici, les conséquences physiologiques pour l'homme. Chapman se veut rassurant sur ce point. D'une part, le trou pourrait être réalisé dans des conditions météorologiques particulières qui permettraient une reconstitution rapide de la couche d'ozone. D'autre part, les astronomes et les populations locales (par exemple, les habitants d'une île peu peuplée) situés dans le trou d'ozone pourraient être protégés de ces rayons UV de longueur d'onde supérieure « de quelques centaines d'angströms » aux rayons habituels, soit par des « vêtements et chapeaux », soit par un « abri approprié ('clothes and headgear, or suitable shelter') ». Si des conséquences physiologiques néfastes sont à envisager, Chapman pense donc qu'« elles ne constituent pas en elles-mêmes une barrière insurmontable à la suppression d'ozone envisagée ».[62] Chapman ne semble guère croire que de tels risques sanitaires existent. Et il est de toute façon très optimiste quant à la possibilité de trancher définitivement la question à l'aide de travaux de laboratoire.[63]

---

[62] Chapman, 1934 :

> "[E]ven if [some physiological] ill-effects were to be feared [since we would no longer be shielded by the ozone from the shorter wave radiation], they perhaps need not in themselves constitute an insuperable barrier to the suggested removal of the ozone. Eclipses of the sun, permitting observations during but a very few minutes, lead astronomers to travel long distances, carrying heavy equipment, to remote parts of the earth. I have little doubt that, if we could offer them a reasonable prospect of those extra hundreds of Angstroms, for a single day or night, or even for a single hour, they would succeed in finding a site for their instruments where these physiological obstacles would not be prohibitive – some small isolated island with few inhabitants, who could be protected by proper clothes and headgear, or suitable shelter, while the harmful rays were coming through.
>
> "Any long persistence of such a hole, even if once created, could scarcely be hoped for (or feared). If all the ozone could instantaneously be removed from the column of air over a ground area of 20 miles diameter (about 300 square miles), a wind of 20 miles per hour would in one hour carry the hole right away from the astronomers, even if at first they were located on the leeward edge. […] The first essential for success in maintaining the hole even for a few hours would be to choose an occasion when the wind speed was low from the ground upwards to 35 or 40 km. height."
> [Chapman, 1934, p. 133]

[63] Chapman déclare :

- *Un appel du pied à la recherche technologique* (ici, pour produire un « déozoniseur » chimique), et *une analyse des coûts économiques* (précisons qu'il s'agit d'un calcul du

---

"It has been remarked that the human race is acclimatised to the amount of ultra-violet radiation that can at present penetrate our atmosphere, but that serious physiological results would follow if we were not shielded by the ozone from the shorter wave radiation. I do not know whether this is true, though it should not be very difficult to ascertain the facts by experiments on human beings exposed to such radiation produced artificially." [Chapman, 1934, p. 133]

Les études menées sur les impacts des UV sur l'homme et le reste du vivant avaient, de fait, été rares jusqu'alors. Elles le demeuraient encore en 1971, lorsque James McDonald lança devant le Congrès américain l'alerte à la destruction de la couche d'ozone (en cas de développement d'une flotte d'avions supersoniques), arguant qu'il pourrait en découler une hausse de 5 000 à 10 000 cancers de la peau par an, pour les seuls Etats-Unis. J. McDonald déclara alors que ce chiffre était le fruit de sa « propre estimation », tout en citant des travaux publiés quelques années auparavant (F. Urbach, 1969, *The biologic effects of ultraviolet radiation* ; A. Hollaender (ed.), 1965, *Radiation biology* ; H.F. Blum, 1959, *Carcinogenesis by Ultraviolet Light* [McDonald, 1971 **in** Andersen & Sarma, 2002, p. 7 ; Conway, 2008, pp. 130-131 & 345]).

Chapman, quant à lui, prenait plus au sérieux les impacts sanitaires qui résulteraient de la réalisation d'un autre projet d'ingénierie de l'atmosphère, qu'il proposa au cours de la même allocution de 1934 : l'injection de traceurs (« indicateurs ») chimiques dans l'atmosphère (un « gaz » – Chapman proposa notamment « l'ozone » ! –, ou « une poudre fine »). Elle devait permettre l'étude des « turbulences atmosphériques à grande échelle ». Là encore, Chapman traite l'atmosphère comme chimiquement réactive ("The indicator should also, of course, be innocuous and incapable of reacting with the atmospheric gases (or with the exhaust gases of a petrol engine) under atmospheric conditions"), et montre le souci de laisser la nature inviolée après son expérience.

Soulignons, pour finir, que le mode opératoire choisi est en tout point semblable à celui de l'autre proposition d'ingénierie :

"An "indicator" [(*e.g.* the pollen)… is] a constituent which can be detected in extremely small quantities. […] I think that by the use of suitable indicators our knowledge of air mixing and transfer, at different heights and in different directions, might be much increased; though I would scarcely recommend pollen for this purpose.

"I suggest the introduction into the air, at known points, of a definite amount of an indicator, which would be a gas [(*e.g.* ozone, which "is in many ways well suited for use as an atmospheric indicator. It could, I think, be introduced artificially into the atmosphere in adequate amounts without any ill-effects")] or fine powder. Either aeroplanes or balloons, not necessarily manned, could be used for this purpose. The indicator should not be a normal constituent of the air, and it should be such as can be detected with accuracy, when present in extremely small concentrations. The means of detection might be chemical or physical; as examples of physical methods I may cite the optical and radioactive methods. The indicator should also, of course, be innocuous and incapable of reacting with the atmospheric gases (or with the exhaust gases of a petrol engine) under atmospheric conditions. It would be carried along with the air in its general motion, and would also diffuse upwards, downwards and sideways by eddy convection and, to a less extent, by molecular diffusion. In a few hours it would be spread throughout a large volume. Its distribution could be determined, at intervals perhaps extending over several days, by air samples collected by aeroplanes, over an increasing range of height and ground area. The dispersion of the expanding cloud of indicator could thus be followed till its concentration was reduced below the limit of measurement.

"Such a research would involve the co-operation of airmen and chemists with meteorologists. The advice and assistance of chemists or physicists in choosing and measuring the indicator would be of essential importance. Hevesy and Paneth have used radio-active indicators in many chemical researches of great delicacy, and perhaps such methods would be applicable in the proposed scheme. […] I should like to see the proposed plan carefully considered and, if possible, organised by some corporate body, such as the British Association (perhaps in conjunction with the Royal Aeronautical Society or some association of flying clubs), which is able to bring together specialists from diverse fields. The importance to meteorology of a detailed knowledge of the rate of transfer and dispersion of air by convection seems to me to justify the effort involved." [Chapman, 1934, pp. 128-129 & 132]

(Il faut souligner, que les méthodes de détection radioactive proposées par Chapman sont prémonitoires de celles, réalisées parallèlement aux essais nucléaires atmosphériques après la Seconde guerre mondiale, qui apporteront une contribution décisive à la construction d'une météorologie à grande échelle et à la formalisation de la circulation du carbone à l'échelle du globe.)

coût du dispositif technologique en lui-même, et non des coûts économiques de réparation des risques environnementaux – puisqu'ils sont jugés nuls !).[64]

- Enfin, Chapman déploie toute une gamme de *métaphores de type "bouclier"*, qui peut s'appliquer aussi bien à la lune lors des éclipses solaires, qu'à la couche d'ozone qui « fait effet bouclier » pour protéger les hommes ('It "shields" people'). On retrouve cette métaphore dans des discours promouvant des projets de géoingénierie contemporains pour contrebalancer le changement climatique, tels que l'injection de particules soufrées dans la stratosphère (cette métaphore est d'autant plus efficace qu'elle fait équivaloir une manipulation artificielle de l'atmosphère à un phénomène naturel, les émissions de particules issues des éruptions volcaniques ; voir par exemple Crutzen, 2006]). Par contre, ces métaphores rentrent en conflit avec des épistémologies plus complexes (… alors que ce sont parfois les mêmes personnes qui portent ces projets et soulignent, dans d'autres sphères de discours, cette complexité (par exemple, Paul Crutzen ; voir dernier chapitre de la thèse). En outre, ce bouclier peut également métaphoriser des substituts technologiques à la couche d'ozone, à déployer au sol, dans une optique de défense de l'individu face aux UV (vêtements, chapeaux, abri), pendant la durée de l'opération de suppression de la colonne d'ozone [Chapman, 1934, p. 133]. Une telle stratégie sera étendue à une biopolitique à la fin des années 1980, suite à l'alerte au trou de la couche d'ozone : prescription de crèmes solaires, de chapeaux ; contrôles dermatologiques, *etc.* (voir Chapitre 7).

Des scientifiques de l'atmosphère globale très détachés des affaires politiques

Les biographes de Sydney Chapman le décrivent comme un passionné d'histoire ancienne, affectionnant les longues marches dans la neige alaskienne, aimant contempler les aurores boréales, et ayant toute sa vie entretenu une intense activité épistolaire [Akasofu Syun-Ichi *et al.* (eds.), 1968]… Quels que fussent les traits de caractère propres au géophysicien britannique, son attitude face à ses objets atmosphériques globaux, les couches atmosphériques supérieures et en particulier la couche d'ozone, n'était pas marginale parmi les scientifiques de l'atmosphère globale jusqu'en 1940. La démarche de Chapman tranche avec celle des sciences pour la guerre des années 1940-1965, qui consistera principalement en

[64] Chapman, 1934 :

"It would seem to entail the discharge of the deozonising agent along a zigzag path, by aeroplanes flying to and fro across the column of air, up to the highest level attainable by them; above this height small balloons, or perhaps rockets, might have to be used to distribute the deozoniser. If the deozoniser were a light gas, it might of itself be able to diffuse upwards with sufficient rapidity through the uppermost five or ten kilometres. If the 'Two possible kinds of deozoniser may be considered'. […] To sum up this brief discussion, the dispersion of the deozoniser would probably offer great difficulty and perhaps prohibitive cost, but the project of making a hole in the ozone layer does not seem quite impossible of achievement. Much would depend on the provision, by the chemists, of a suitable deozoniser." [Chapman, 1934, pp. 134-135]

une expertise de recherche finalisée pour les Etats belligérants. Une telle attitude étant particulièrement marquée pour les scientifiques de l'atmosphère, dont l'expertise visera souvent l'optimisation et la sécurisation de technologies belligérantes (avions, armes, satellites) (voir Chapitre 2).

Avant 1940, la grande majorité des spécialistes de l'atmosphère à grande échelle ou à l'échelle globale sont des physiciens, souvent astronomes ou géophysiciens. Ils cherchent à construire des histoires plurimillénaires de l'atmosphère (et de la Terre), ou conçoivent leur activité comme une recherche de formalisation d'une atmosphère en équilibre, c'est-à-dire comme *theoria*. C'est en tout cas le terme *theoria*, emprunté à Aristote (mais, il faut bien l'admettre, vidé de sa substance),[65] qu'Alexandre Koyré emploie dans sa communication « Perspectives sur l'histoire des sciences » au Colloque d'Oxford de juillet 1961. A. Koyré y défend que « la science, celle de [son] époque, comme celle des Grecs, est essentiellement *theoria*, recherche de la vérité, et que de ce fait elle a, et a toujours eu une vie propre, une histoire immanente, et que c'est seulement en fonction de ses propres problèmes, de sa propre histoire qu'elle peut être comprise par ses historiens. » Une telle assertion nous procure aujourd'hui une certaine gêne, d'autant plus grande que la phrase a été prononcée par le philosophe et historien des sciences dans le contexte scientifique des années 1940-60.[66] Elle sied toutefois relativement bien aux sciences telles qu'elles pouvaient être pratiquées par G. Dobson et S. Chapman entre 1920 et 1940. S. Chapman était un théoricien, un mathématicien-astronome de formation. Ses principes religieux, expliquent O'Connor et Robertson, faisaient en outre de lui un pacifiste, si bien qu'il avait été exempté de service militaire et été resté à Cambridge au cours de la Première guerre mondiale. Son intérêt pour

[65] Chez Aristote, la *theoria* désigne une recherche de connaissance à visée contemplative, par opposition aux activités pratiques. Elle s'insère dans toute une épistémologie et une axiologie, qu'A. Koyré met de côté. Sur la *theoria* aristotélicienne, voir par exemple Crubellier & Pellegrin, 2002, pp. 208-219.

[66] … Mais, précisément, il faut replacer le projet de Koyré dans le contexte traumatique post-Seconde guerre mondiale. La visée de la communication de Koyré, proférée en pleine Guerre froide seize ans seulement après l'Armistice de 1945, est plus normative que descriptive. L'« époque » dont il parle, « son » époque, est à comprendre comme prise dans un tout civilisationnel : quelque civilisation post-galiléenne. Car, Koyré veut voir dans le développement d'un certain type de science – qu'il affirme (hélas !) être « l'essen[ce] » des sciences – un rempart au totalitarisme. Le champ de l'histoire et de la sociologie des sciences anglo-saxonnes d'après-guerre est dominé par des libéraux, qui assimilent les bonnes valeurs scientifiques aux valeurs du libéralisme économique et/ou social (Popper, Merton, Kuhn, Ben-David, *etc.*). Tout aussi profondément antitotalitariste que ces derniers, et ne souhaitant pas non plus être affilié, par ailleurs, à l'histoire des sciences marxiste, Koyré va mettre l'accent sur un aspect particulier du « développement », du « progrès » des sciences : l'effort théorique. La science serait avant tout *« theoria »*, « recherche de la vérité, *itinerarium mentis in veritatem* ». Et son histoire présenterait « un intérêt », car « elle nous révèle l'esprit humain dans ce qu'il a de plus haut ». Suite aux expériences traumatiques de la Seconde Guerre mondiale, Koyré se trouve empli d'une répulsion pour les sciences asservies à la politique, qui avaient fini par servir les crimes les plus abominables [Braunstein, 2008, p. 91-92]. Il écrit :

> « [Certes, pour que la science naisse et se développe,] il faut […] que cet exercice de la *theoria*, l'activité scientifique, ait une valeur aux yeux de la société. Or, ce sont là choses nullement nécessaires ; ce sont même choses très rares, et qui, à ma connaissance, ne se sont réalisées que deux fois dans l'histoire [: à Athènes, et en Occident dans la lignée de Galilée… Par exemple,] les aristocraties guerrières méprisent la science – aussi ne l'ont-elles pas cultivée, ainsi Sparte ; les sociétés « acquisitives » de même, ainsi Corinthe. Je pense qu'il est inutile de donner des exemples plus récents. » [Koyré Alexandre, 2008 (1961), p. 155]

l'ozone était celui d'un géophysicien ou d'un astronome, sans qu'il y vît d'enjeux politiques. [O'Connor & Robertson, 2012]

G. Dobson, par contre, n'appartenait pas à une tradition de la recherche scientifique qui prônait le désintéressement, la valeur du savoir scientifique 'per se'. Titulaire d'un 'BA in Natural sciences' (1910), Dobson a très rapidement montré une inclination pour la Physique expérimentale et la météorologie. Pourtant, l'ozone fut pour lui l'opportunité d'un accomplissement expérimental et académique, qui le tint à l'écart d'une science finalisée pour la prédiction météorologique, qu'il aurait tout aussi bien pu épouser dans la lignée de ses premiers travaux pour William Napier Shaw, ou comme il le fit au cours des deux Guerres mondiales pour l'armée britannique. La rencontre décisive qui mena Dobson vers la haute atmosphère puis l'ozone fut celle avec Lindemann. Ce dernier l'avait recruté en 1920 à Oxford comme simple préparateur en météorologie. Dobson devra toutes ses distinctions académiques à ses mesures d'ozone, à commencer par sa nomination comme 'Fellow of the Royal Society' en 1927.[67] Or, la recherche sur l'ozone demeura jusqu'en 1940 un programme sans enjeux politiques décisifs. [O'Connor & Robertson, 2012]

De nombreux savants des deux premiers tiers du XIX^{ème} siècle n'excluaient pas les capacités de l'homme à modifier l'environnement à l'échelle globale – en particulier, sa capacité à modifier le climat global, en s'attaquant aux forêts (ainsi, Georges-Louis Leclerc Buffon ou François Marie Charles Fourier)[68]. L'attitude de S. Chapman et de G. Dobson du début du XX^{ème} siècle est toute différente. Ceci s'explique manifestement par le fait que, comme l'écrivent Jean-Baptiste Fressoz et Fabien Locher, au cours du dernier tiers du XIX^{ème} siècle, l'évolution des sciences s'est faite dans un sens qui a favorisé d'autres

[67] Contrairement à Chapman, Dobson se voyait comme un météorologue avant de se voir comme un géophysicien. Son statut de 'Fellow of the Royal Society' lui permit d'occuper une place *institutionnelle* importante dans le paysage météorologique britannique. Nous soulignons *institutionnelle*, car les travaux pour lesquels il fut reconnu étaient consacrés à l'ozone stratosphérique. Dobson fut décoré de la 'Royal Meteorological Society Symons Medal' (1938), puis devint Président de la 'Royal Meteorological Society' (1947-49). Il eut même la charge de travaux de météorologie des pollutions, en tant que Président de l'"U.K. Government Atmospheric Pollution Committee' entre 1934 et 1950… c'est-à-dire dans les années qui précédèrent le 'Big Smoke' (ou 'Great Smog') de Londres de 1952 ! [*Encyclopedia.com*, 2013 (2008), "Dobson, Gordon Miller Bourne", Complete Dictionary of Scientific Biography. 2008, 3 Feb. 2013 <http://www.encyclopedia.com> (08/02/2013)]

[68] Dans les cercles savants, le « climat » du début du XIX^{ème} siècle a une acception "large", "néo-hippocratique". Il est conçu comme un ensemble de processus dynamiques qui concourent à produire le caractère d'un lieu : précipitations, pressions, vents, émanations, topographie, sols, eaux, végétation, lumière, électricité, fumées, *etc.* Mais, ce « lieu » peut parfois être le globe, et les paramètres pris en compte se réduire brutalement. Ainsi, prenant acte des « dérèglements » de la météorologie locale ou régionale en lien avec la déforestation (au sortir du terrible hiver de 1820-1821, le ministère français de l'Intérieur consulte même les préfets sur les dérèglements qu'a pu connaître le « système météorologique » de leurs départements en lien avec la déforestation), François Marie Charles Fourier globalise *in abstracto* le problème, pour faire de l'humanité une force planétaire et de la planète un être fragile, soumise au changement du climat global, imputé au déboisement. Précisons, c'est important, que le philosophe français n'est pas un cas isolé. L'affectation du climat global par déforestation est également discutée, dans les mêmes années, dans les prestigieuses Académie des Sciences française et 'Royal Society', ou encore dans les *Annales européennes* (F.-A. Rauch, 1825, Vol. 6). Parfois, le risque *d'irréversibilité* du changement est en outre avancé. [Fressoz & Locher, 2010 ; Fressoz, 2012]

échelles de temps et d'autres chaînes de causalité dans l'analyse des processus climatiques. Les climats, et en tout cas le climat global, sont à présent « vus comme des cadres fixes, constants à l'échelle du millénaire, et imposant leurs contraintes particulières au développement des sociétés ». A l'inverse de la théorie néo-hippocratique qui avait dominé les deux premiers tiers du XIX^{ème} siècle, où les « choses environnantes » conditionnaient de manière presque exclusive les étiologies sanitaires et sociales, et où l'homme en retour était en capacité de modifier de multiples manières son environnement – dont il était en définitive indissociable –,[69] le climat de la fin du XIX^{ème} siècle et du début du XX^{ème} siècle est fortement décorrélé du social [Fressoz & Locher, 2010 ; Fressoz, 2009 & 2012].[70] Le climat global, en particulier, va être redéfini quantitativement avant tout pour faire le récit des successions des âges glaciaires selon des paramètres extérieurs à l'action humaine : variations du nombre de taches solaires, modifications de la trajectoire et de la position de la Terre sur son axe, fluctuations des concentrations atmosphériques en vapeur d'eau, en CO_2, en aérosols. Si Svante Arrhenius pointe du doigt les usines à charbon comme potentiels émetteurs significatifs de CO_2, qui pourraient induire des modifications significatives du climat dans les siècles suivants, l'hypothèse n'est guère discutée au début du XX^{ème} siècle. De plus, les temporalités d'altération du climat global que propose Arrhenius sont longues, de l'ordre de trois siècles, ce qui en diminue sa portée politique [Arrhenius, 1896].

L'attitude des aéronomes et géophysiciens des années 1920-30 est, par ailleurs, plus désintéressée que celle des années 1940-60, alors que la stratosphère devient un objet stratégique des sciences pour la guerre. Elle contraste, plus encore, avec la recherche des sciences de l'environnement global des *décennies post-1970*, dont la finalité première est l'expertise environnementale pour le politique. Pour les géophysiciens du début du XX^{ème} siècle, et pour la plupart d'entre eux jusque dans les années 1960, la couche d'ozone est

[69] Le « néo-hippocratisme » concevait le corps comme façonné par de nombreux éléments l'environnant, tels que les températures, les climats, les vents, la lumière, les odeurs, et bien sûr les miasmes (émanations provenant de matières organiques en décomposition dans l'air ou l'eau, et considérées comme l'agent des maladies infectieuses et épidémiques). En focalisant le regard médical sur les micro-organismes, le Pasteurisme marginalisera ce paradigme à la fin du XIX^{ème} siècle.

[70] Sur les mécanismes de redéfinitions du climat – hautement "politiques" pour certains d'entre eux –, voir Fressoz & Locher, 2010 ; Fressoz, 2012 & 2009.

« Dans la seconde moitié du XIX^{ème} siècle, écrivent Fressoz et Locher, la climatologie s'organise comme une discipline scientifique structurée autour de la production et du traitement de grandes masses de nombres, mises en carte pour caractériser des « régions climatiques » aux propriétés et aux contours quasi immuables. L'idée d'une transformation des climats sous l'action de l'homme reflue et dans le même temps cette notion de climat change de sens pour désigner restrictivement une certaine régularité dans les moyennes des variables atmosphériques (température, hygrométrie, pression, *etc.*). Avec l'essor de la glaciologie un peu plus tôt dans le siècle s'est par ailleurs imposée l'hypothèse, au départ controversée, d'une succession de cycles glaciaires ayant affecté de vastes zones de la surface terrestre. L'origine des glaciations est discutée mais un consensus existe pour en attribuer la survenue à des causes extérieures à l'agir humain : variations des taches solaires et surtout évolutions séculaires de la trajectoire et de la position de la Terre sur son axe, selon la théorie – aujourd'hui encore en cours – du savant serbe Milutin Milankovic. Les climats sont vus comme des cadres fixes, constants à l'échelle du millénaire, et imposant leurs contraintes particulières au développement des sociétés. » [Fressoz & Locher, 2010, pp. 12-13]

conçue comme auto-régénératrice (ce pourquoi les équations de Chapman décrivent un cycle) et le climat global est conçu comme étant en équilibre – ou presque. Guy Callendar, ingénieur, météorologiste et géophysicien, qui propose en 1938 dans le *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society* une théorie de l'effet de serre (Callendar, 1938), déplore cet *a priori* qui règne dans la communauté savante. Son biographe James Fleming rapporte qu'il rédigera en mars 1964 une note dans son carnet personnel sur « les raisons pour lesquelles [son article publié en 1961 dans le *Quarterly Journal*] en avait dérangé certains ». D'après G. Callendar, la principale raison provenait du fait que considérer « le CO_2 comme cause de changement climatique […] « dépassait » [encore] la presque totalité des auteurs sur le sujet, pour qui il s'agissait d'une spéculation parmi d'autres, à mettre sur le même plan que les effets soleil - u.v. - ozone » [Callendar, 1964, "personal note" **in** Fleming, 2007(c), pp. 82-83].

En effet, dans les années 1930-60, les paramètres radiatifs et chimiques globaux de l'atmosphère sont pensés par la grande majorité des géophysiciens comme des objets géologiques, dont les déséquilibres se produiront au plus tôt dans plusieurs millénaires, à l'image des périodicités des ères glaciaires. Même les quelques scientifiques qui croient les émissions de CO_2 anthropiques capables d'induire des fluctuations de la température atmosphérique globale moyenne estimaient que ces changements se produiraient sur plusieurs siècles. Dans les publications scientifiques, les questionnements scientifiques sur l'ozone stratosphérique et le changement climatique globale ne sont jamais associés à des enjeux politiques. G. Callendar lui-même ne cherche nullement à lancer une alerte environnementale, mais se contente de corréler émissions de CO_2 et température globale. [Callendar, 1938]

Cette "insouciance" est d'autant plus affirmée au sujet de la couche d'ozone, dont on n'essaie pas même d'imaginer les conditions de possibilité de son altération. En sa qualité de 'Fellow' de la 'Royal Society', Gordon Dobson communique en 1938 dans le *Quarterly Journal Royal Meteorological Society* l'article programmatique de G. Callendar, qui souhaite stimuler la recherche sur le changement climatique d'origine anthropique.[73] C'est donc que Dobson juge

[73] Gordon Dobson, alors 'Fellow' de la Royal Society (F.R.S.) « communique » l'article de Callendar sur « la production artificielle du dioxyde de carbone et son influence sur la température » dans le '*Quarterly Journal Royal Meteorological Society'* en 1938. Au cours de la même année, Dobson se verra remettre la 'Royal Meteorological Society Symons Medal'. Dix ans plus tard, il présidera la 'Royal Meteorological Society' (1947-49). Quant à Guy Callendar, s'il bénéficie déjà d'une reconnaissance solide au sein de communauté des météorologues britanniques au moment de la parution de son article de 1938, il est présenté comme "Steam Technologist to the British Electrical and Allied Industries Research Association". [Callendar, 1938, p. 223]

Dans son article de 1938, Callendar défend qu'un faible réchauffement climatique global serait en cours, à cause des émissions de CO_2 par combustion fossile anthropique :

> "By fuel combustion man has added about 150,000 million tons of carbon dioxide to the air during the past half century. The author estimates from the best available data that approximately three quarters of this has remained in the atmosphere.
>
> "The radiation absorption coefficients of carbon dioxide and water vapour are used to show the effect of carbon dioxide on " sky radiation." From this the increase in mean temperature, due to the artificial production

crédible la possibilité d'un changement climatique d'origine anthropique, donc la possibilité d'une altération anthropique de l'atmosphère globale. Pourtant, il n'envisagera jamais la possibilité d'une dégradation anthropique de la couche d'ozone (pas même, semble-t-il, après les publications sur le sujet en 1970-71, 1972 et 1974).

Sydney Chapman non plus, qui décéda en 1972, soit deux ans tout au plus après le premier lancer d'alerte à la destruction de la couche d'ozone (et quatre ans avant la disparition de G. Dobson). Mais, voulons-nous souligner pour finir, qu'il développe ou non effectivement une forme de *theoria* au sens de Koyré, Chapman ne se réclame évidemment nullement de l'*epistémè* et des pratiques des Anciens. Bien qu'il regarde l'atmosphère, moins comme un objet à contrôler, ou un objet dont anticiper les réactions afin de pouvoir le coloniser de manière sécurisée, qu'un objet à connaître, Chapman n'appartient pas moins à une tradition moderne qui conçoit la nature comme un ordre modifiable. Son optimisme quant à la possibilité d'inciser la couche d'ozone avec une précision chirurgicale est même déroutant.

En revanche, l'attitude de Chapman n'est pas positiviste. Il ne s'agit pas de corriger la nature afin d'optimiser la prospérité humaine et l'harmonie de l'homme en société avec son environnement. Chapman juge la nature plutôt "bonne" en l'état. Son ingénierie de l'atmosphère a pour but d'obtenir une connaissance qui peut se présenter comme "désintéressée". Ce manque d'enjeu à court terme explique peut-être que sa proposition de 1934 soit restée lettre morte, dans un contexte où la crise économique et la guerre allaient pousser les scientifiques à se concentrer sur des élaborations plus immédiatement utiles à leurs Etats. Pacifiste pendant la Première Guerre mondiale, Chapman prendra part à la « recherche militaire opérationnelle » au cours de la Seconde Guerre mondiale, devant la menace que représentait le Nazisme. Exceptionnellement, la recherche qu'il mena alors visa des développements scientifiques et technologiques aux retombées immédiates (le développement de bombes incendiaires, en l'occurrence). [O'Connor & Robertson, 2012]

1.3. La compartimentation disciplinaire des sciences de l'atmosphère

Le cheminement intellectuel de Chapman l'a amené à formuler le premier schème théorique de chimie expliquant la composition de l'atmosphère globale. Ce fait d'armes a fait

of carbon dioxide, is estimated to be at the rate of 0.003°C. per year at the present time.

"The temperature observations at 200 meteorological stations are used to show that world temperatures have actually increased at an average rate of 0.003°C. per year during the past half century. [Callendar, 1938, p. 223]

temporairement de la spectrophotométrie de l'ozone une « zone d'échange » entre traditions disciplinaires indépendantes jusqu'alors. D'autres traditions, par ailleurs, peuvent voir dans cette spectrométrie de l'ozone une contribution à leur discipline.

D'une part, les *géophysiciens*, qui établissent des "bilans radiatifs" atmosphériques globaux, trouvent dans les quantifications d'ozone un apport empirique important, aux côtés des quantifications des effets radiatifs du CO_2 et de la vapeur d'eau. Du fait des propriétés radiatives du gaz ozone, la détermination de ses concentrations donne lieu à des théorisations nouvelles sur les flux d'UV et sur le climat, à l'échelle globale et sur de grandes temporalités. Les théories sur la présence de la vie sur Terre (et sur son impossibilité sur les autres planètes) intègrent la couche d'ozone, pour des raisons climatiques, et également parce que les UV sont déjà connus pour affecter les cellules vivantes. En 1942, les astronomes français Barbier et Chalonge écrivent ainsi que l'ozone a « un rôle très important, tant pour l'équilibre thermique qu'au point de vue biologique » (puisqu'il absorbe des rayons UV) [Barbier & Chalonge, 1942, p. 44]. Toutefois, l'importance *sanitaire* de l'ozone et son rôle dans la sélection des espèces seront peu étudiés jusqu'aux alertes sur les destructions anthropiques de l'ozone dans les années 1970.

Par ailleurs, les *météorologistes* prennent eux aussi en compte les mesures d'ozone. Les aspects radiatifs occupent une place croissante dans leur discipline. Outre les considérations sur la météorologie propre à la stratosphère, il s'agit de corréler les dynamiques cycloniques et anticycloniques au différentiel de température entre troposphère et stratosphère et/ou au différentiel de concentrations d'ozone dans la stratosphère (voire dans la haute atmosphère).[74] En définitive, la présence d'ozone dans l'atmosphère pouvait trouver des implications dans la plupart des champs d'étude sur l'atmosphère, mais n'y occupait jamais une place centrale.

L'objectif principal de ce dernier Sous-chapitre est de réévaluer les hybridations et ruptures entre disciplines d'étude de l'atmosphère de la première moitié du XX^{ème} siècle, en intégrant notre propre travail sur la naissance de l'aéronomie et de la chimie de l'ozone. Nous proposerons, pour conclure, un état des lieux disciplinaire des études sur l'atmosphère au milieu du XX^{ème} siècle.

---

[74] Dobson, 1968:

> "In the very beginning of the 1920s, "it was well known from the work of Dines (Dines, 1912) and others that the stratosphere was warmer in cyclonic conditions and colder in anticyclonic conditions, and Lindemann [(with who Dobson would write an article in 1922)] also suggested that these differences of temperature *might* be due to different amounts of ozone in the stratosphere – cyclonic conditions having much ozone and anticyclonic conditions little ozone. It also seemed just possible that cyclones and anticyclones might be actually caused by different amounts of ozone in the upper atmosphere. We know now that there is, indeed, more ozone in cyclonic conditions than in anticyclonic conditions but that this is not the cause of the different pressure systems. However, Lindemann's suggestions made it desirable to try to make regular daily routine measurements of the amount of ozone in the atmosphere on the lines of the few measurements then recently made at Marseilles by Fabry and Buisson. [Dobson, 1968, p. 388]

La situation disciplinaire des études atmosphériques au début du XX^{ème} siècle

L'historien Frederik Nebeker a montré que la « météorologie » ("meteorology"[75]) du tournant du XX^{ème} siècle incluait une grande variété d'études, dont « trois principaux canaux d'activité » :

1. « La tradition empirique de climatologie » (ou « météorologie descriptive »). Le terme climatologie date de 1834, puis la climatologie acquiert le statut de science dans la deuxième moitié du XIX^{ème} siècle. Dès 1817, A. von Humboldt avait proposé une carte hémisphérique des températures moyennes (son système des lignes servira ensuite également la tradition pratique de prévision du temps). A partir de la fin du XIX^{ème} siècle, l'acception néo-hippocratique du climat reflue. Il désigne à présent la plupart du temps une étendue de pays dans laquelle la température et les autres conditions de l'atmosphère et de la végétation sont partout semblables. La climatologie du début du XX^{ème} siècle est essentiellement statistique et inductive, et s'appuie sur des tracés de graphes et de cartes de natures parfois très différentes, réalisés par des météorologistes, des géographes, des naturalistes, des statisticiens.
2. « La tradition théorique de physique de l'atmosphère », ou « météorologie dynamique » (ou encore « météorologie physique »). Tradition déductive, elle s'est développée à partir de la fin du XIX^{ème} siècle, notamment sous l'impulsion de W.N. Shaw. Elle applique directement des lois de la physique à l'atmosphère.
3. « La tradition pratique de prévision du temps ». Principalement statistique, ni tributaire de la climatologie ni de la météorologie dynamique à la fin du XIX^{ème} siècle, elle bénéficie alors du développement du télégraphe (qui permet de réaliser des cartes de l'atmosphère du jour, figurant les pressions, les températures et les vents, à partir des mesures dans les différentes stations météorologiques, puis d'en induire le temps des heures qui suivent, du lendemain, voire des jours suivants). Elle profite en outre de sa popularité médiatique (même si, dans le même temps, le "contrôle populaire, profane" des prévisions du temps conduit

[75] Par "meteorology", les anglo-saxons désignent traditionnellement la science théorique des phénomènes atmosphériques dominant à de faibles échelles de temps, à contraster avec les très statistiques et inductifs "climatology" (pour les phénomènes à plus grande échelle de temps) et "weather forecasting" (pour la prévision du temps, nécessairement à court terme). "Meteorology" ne désigne donc qu'une partie de notre « météorologie » francophone, qui se compose en définitive des "meteorology" et "weather forecasting" anglophones. La distinction opérée dans le monde anglo-saxon est historiquement fondée, puisque les champs de la "meteorology" et du "weather forecasting" se sont développés de manière largement indépendante au XIX^{ème} siècle et au début du XX^{ème} siècle – avant que des tentatives d'inféoder le "weather forecasting" aux lois de la "meteorology" ne soient faites, puis que la modélisation numérique ne recompose les deux champs tout en les rendant fortement coextensifs (voir Nebeker, 1995, pp. 87-90 et Guillemot, 2007(a)). Sauf indication contraire, nous désignerons toujours par « météorologie » la "meteorology" des Anglophones. Nous n'évoquerons par ailleurs guère la pratique de prévision du temps, ou "weather forecasting".

souvent à décrédibiliser les prévisionnistes du monde académique). [Nebeker, 1995, « Part I. Meteorology in 1900 », pp. 11-44 ; Locher, 2008 ; Grevsmuehl, 2014 (à paraître)]

Au tournant du XX[ème] siècle, la météorologie se présente donc comme une science composite, se déclinant en climatologie, météorologie dynamique et prévision du temps.[76] « Une nouvelle branche » de la météorologie apparaît alors : l'*aérologie* ("aerology"). Elle atteste l'exploration nouvelle d'une troisième dimension de l'atmosphère, sa verticalité. C'est Wladimir Köppen, qui propose le nom d'aérologie « pour l'étude de la haute atmosphère », lors d'une rencontre de l''International Commission for Scientific Aeronautics' en 1906. Köppen, qui voyait l'aérologie comme une branche de la météorologie (tout comme la climatologie), la décrivait comme une science triple : « la science des mesures de l'atmosphère libre,[77] la collecte de données, et la mise en conformité des données avec les lois physiques » [Neis, 1956, p. 19 **in** Nebeker, 1995, p. 48].

L'apparition de cette troisième dimension donne de grands espoirs à certains météorologistes, qui reconnaissent immédiatement les mesures de « pression », de « température » et de « tension de vapeur »[78] obtenus par cerfs-volants et ballons, associées à l'étude des « mouvements des masses d'air révélés par l'observation des nuages » (donc en définitive l'étude de "l'atmosphère libre" sur toute sa hauteur), à la fois comme un prompt renfort pour la prévision du temps, et comme un vaste programme de recherche en soi. Le physicien norvégien, devenu météorologiste, Vilhelm Bjerknes (1862-1951), fait partie de ces « optimistes ». Les mesures en altitude de l'aérologie doivent l'aider à atteindre l'objectif que s'est fixé son aîné britannique W. Napier Shaw (1854-1945) : « utiliser les lois de la physique pour prédire le temps ». En d'autres termes : « unifier la météorologie » prise dans son acception large, c'est-à-dire composée, comme nous l'avons dit, d'une climatologie, d'une météorologie dynamique et d'une tradition pratique de prévision du temps. [Bigelow, 1902, p. 22 **in** Nebeker, 1995, p. 49 ; Nebeker, 1995]

---

[76] On pourrait également compter, parmi ces traditions d'études "météorologiques", la « météorologie morphologique », chère à la tradition « romantique ». La classification des nuages en fonction de leurs attributs visibles, dessinées par Luke Howard (1802-03), avait suscité l'admiration de Johann W. von Goethe. La « météorologie morphologique » était très qualitative ; ses pratiques de représentation étaient proches de celles des naturalistes de la morphologie végétale ou animale. Cette pratique inspira la génération suivante, notamment au sein d'un programme de recherche que P. Galison nomme « physique de la condensation ». Si cette dernière demeurait principalement une tradition mimétique, elle s'attachait également à déterminer quantitativement des conditions de possibilité de formation des nuages à l'aide de modèles matériels. Dans leurs chambres à nuages, Coulier et Aitken cherchèrent à produire une saturation de l'air autour de particules solides neutres (*dust*), puis C.T.R. Wilson autour de particules porteuses d'une charge électrique. [Galison, 1997, chapter 2]

[77] « Atmosphère libre » : partie de l'atmosphère au-dessus de la couche limite planétaire (située aux alentours de 1 ou 2 kilomètres au-dessus du sol), où les effets de la friction de la surface terrestre sur l'air deviennent négligeables.

[78] « Tension de vapeur » ('Vapour tension'): pression qu'exerce la vapeur saturée d'une substance à l'équilibre sur sa forme solide ou liquide, à une température donnée.

V. Bjerknes commence par appliquer des théorèmes d'hydrodynamique à l'atmosphère – dont certains sont de son propre fait. Il en vient bientôt à penser que « sept quantités » (les trois directions du vent, la pression, la température, la masse volumique de l'air et son contenu en eau par unité de volume), qui tombent selon lui toutes sous l'autorité de lois hydrodynamiques ou thermodynamiques connues, pourraient suffire à accomplir la tâche que s'est attribuée la météorologie observationnelle : « caractériser complètement l'atmosphère à un endroit et à un moment précis ». Bjerknes obtient 'in fine' un système d'équations. Il ne cherche à résoudre ce système d'équations physiques que graphiquement, et non numériquement. Mais, l'écueil du très long temps de calcul nécessaire ne s'en dresse pas moins.[81] De plus, l'efficacité prévisionnelle de sa science est loin d'être éclatante. [Nebeker, 1995, pp. 47-57]

Chapman, 1946 : « Un plaidoyer pour l'abolition de la « météorologie » » et pour l'avènement d'une science atmosphérique unifiée, « l'aéronomie »

En 1928, le météorologiste suédois Carl-Gustaf Rossby (1898-1957), un ancien étudiant de V. Bjerknes (à Stockholm, puis au sein de l'Ecole de Bergen en Norvège), qui a émigré aux Etats-Unis en 1926, crée au MIT ('Massachusetts Institute of Technology' ; 1861-…) le premier programme professionnel d'enseignement supérieur de météorologie ('meteorology') du pays (et, en 1940, la météorologie obtiendra un « département » indépendant au MIT). Entre 1917 et 1939, des douzaines de présentations très complètes de la théorie météorologique sont publiées, alors que, depuis le milieu du XIX^{ème} siècle, « presque tous les livres publiés avaient été des "compilations de données" et des "manuels pour observateurs" », écrit F. Nebeker. Toutefois, malgré les efforts de météorologistes comme C.-G. Rossby (vers 1940), pour élaborer « des équations qui seraient à la fois en accord avec les observations et pourraient être résolues par le calcul » (en mêlant approches déductive et inductive), les traditions de prévision du temps et de formalisation de l'atmosphère ne dialoguent toujours guère à l'amorce de la Seconde guerre mondiale. Au début des années 1910, unifier les sciences de l'atmosphère, ou « météorologie », signifiait, aux yeux de Vilhelm Bjerknes : soumettre la prévision du temps, héritière de la tradition climatologique (mais différente par ses échelles de temps et subséquemment par ses méthodes), à une météorologie dynamique théorique calquée sur les équations de la dynamique post-newtonienne. L'échec de son programme, reproduit par plusieurs météorologistes dans les années 1910-20, avait abouti à une situation où prévision du temps

[81] Ce problème du temps de calcul demeurera au cœur des inquiétudes des météorologistes prévisionnistes des décennies suivantes, y compris après l'avènement du calcul numérique par ordinateur. Quant à l'intégration de la troisième dimension atmosphérique, donc de l'aérologie, dans les modèles numériques de météorologie, elle ne sera guère répandue avant les années 1970.

et météorologie théorique dialoguaient toujours très peu. *Une telle séparation demeure marquée jusque dans les années 1940 au moins* – avant que le champ ne soit peu à peu métamorphosé par la modélisation numérique et les observations satellitaires. [Nebeker, 1995, pp. 87-90]

Au cours de la décennie 1940, plusieurs voix s'élèvent en outre pour *contester l'usage du terme météorologie comme appellation générique des études sur l'atmosphère*. D'une part, la « météorologie » a diversifié et redéfini ses objets d'étude, bien au-delà de l'impulsion initiale contenue dans son étymologie (la « météorologie » comme étude des météores solides et des hydrométéores, c'est-à-dire des corps perceptibles dans l'air). Et surtout, comme l'avait défendu l'Ecole de Bergen dès la fin des années 1910, la météorologie ne pouvait plus s'en tenir à la formalisation des masses d'air par la mécanique post-newtonienne, c'est-à-dire à la « météorologie dynamique » traditionnelle – à laquelle certains comme Bjerknes avaient voulu, en vain, réduire les savoirs scientifiques sur l'atmosphère au cours des trois premières décennies du XX^{ème} siècle.

D'autre part, les développements de l'aérologie et des études sur la haute atmosphère ont stimulé l'intégration des paramètres radiatifs dans la météorologie, et même posé la question de l'importance de la réactivité chimique de l'atmosphère (question qui demeure, insistons-nous, presque insignifiante). Mais, les successeurs plus ou moins dissidents de V. Bjerknes – L.F. Richardson, l'Ecole de Bergen[82], G. Rossby, *etc.* – n'ont pas été plus captivés que leur prédécesseur norvégien par les aspects physiques et chimiques des moyenne et haute atmosphères.[83] Les effets optiques, et les réactions photochimiques dans l'atmosphère, ainsi que les phénomènes électromagnétiques de l'ionosphère, sont presque toujours l'apanage des géophysiciens-astronomes, plutôt que des météorologistes et des chimistes.[84]

---

[82] Durant l'entre-deux guerres, l'Ecole de Bergen norvégienne développa et imposa au monde de la météorologie occidentale une vision alternative à celle du "premier Bjerknes" (car le "second Bjerknes" fut le premier directeur de cette équipe de Bergen qui prit forme à partir de 1917). Sa stratégie, reposait sur l'établissement de « règles de "niveau supérieur" (""high-level" rules"), spécifiques à la météorologie et non connectées à la Physique ». Plus tard nommée « analyse des masses d'air », résume F. Nebeker, les travaux de l'Ecole de Bergen engendreront une conception des anticyclones et des dépressions proche de la nôtre, reposant sur les « nouveaux concepts de masse d'air, de front froid, de front chaud, de front occlus. » Cette nouvelle approche, toutefois, n'annihilait pas la météorologie dynamique ; et, par ailleurs, ces deux approches quantitatives, l'une très réductionniste (à des paramètres physiques "de base", expliquant par exemple la condensation) et l'autre plus focalisée sur les mouvements généraux de masses d'air, n'étaient pas irréconciliables. [Nebeker, 1995, pp. 84-86]

[83] Dans le cadre théorique de V. Bjerknes et de ses successeurs, l'aérologie apportait seulement une dimension supplémentaire, l'altitude. Les représentations de l'atmosphère en altitude se réduisaient, comme celles du sol, à quelques lois universelles de l'hydrodynamique et de la thermodynamique formalisant les rapports de sept variables tout au plus. Les météorologistes qui poursuivirent son dessein ne trahirent pas non plus la physique dynamique.

[84] Nebeker écrit que « les effets optiques dans l'atmosphère, les réactions photochimiques dans l'atmosphère, ainsi que les phénomènes électromagnétiques de l'ionosphère, étaient des matières étudiées par les physiciens et les chimistes plutôt que par les météorologistes ». En fait, les chimistes se firent tout aussi rares dans ces champs d'étude que les météorologistes, voire même plus. Pourtant, faire appel à des chimistes pour modifier artificiellement les propriétés de la stratosphère (*cf.* Chapman, 1934) aurait pu stimuler leur intégration dans les études sur la moyenne atmosphère. Mais, cette technochimie de l'atmosphère ne dépassa pas le stade de projet. Plus généralement, les chimistes ne s'intéresseront guère à l'atmosphère dans les deux décennies qui suivront. Lorsque certains chimistes s'y attelleront, dans les années 1950-60, ils demeureront exclusivement préoccupés par la pollution troposphérique. Comme nous l'expliquerons dans les chapitres suivants, jusqu'en 1970 (date de l'alerte à la destruction anthropique

Parmi les grands absents des « météorologies » des successeurs de Bjerknes, on trouve, enfin, les études sur les aspects radiatifs des gaz à effet de serre et les aérosols. [Nebeker, 1995, p. 50]

Le paradigme radiatif et la montée en échelle de la météorologie : la tentation d'une science commune à toutes les études de l'atmosphère

Au sortir de la Seconde guerre mondiale, dans une courte « lettre aux rédacteurs en chef » du premier volume de la revue *Weather* (1946), Sydney Chapman milite pour la création d'une science de l'atmosphère plus intégrative que celle des météorologistes, qu'il propose de nommer "aéronomie". Il ne faut pas se fier au titre de la lettre, en forme d'oxymore – « un plaidoyer pour l'abolition de la "Météorologie" ("A Plea for the Abolition of "Meteorology"") » –, qu'adresse Chapman aux météorologistes. L'humeur de l'astronome, et géophysicien britannique n'est pas à la révolte. Le contenu de la lettre ne s'aventure guère au-delà de considérations, qui phonétiques, qui d'ordre pratique sur les appellations possibles à donner à une science générale de l'atmosphère. Chapman confie par exemple que « le mot *'meteorology'* [… lui] apparaît convenable ('congruous') à écrire [mais] peu commode en conversation ('inconvenient in speech') », que le terme d'« *'Atmophysics* [… est] plutôt rude à prononcer, et trop « sibilant » dans sa forme dérivée *'atmophysicist'* » !, *etc.* Quant au terme « *'Atmospherics'* », qui aurait pu servir de substitut à *'meteorology'*, son usage s'est déjà imposé dans le milieu spécifique de la détection « radio », explique Chapman. [Chapman, 1946, p. 146]

Néanmoins, le projet de Chapman n'est pas uniquement poétique. La carrière de Chapman ne laisse guère de doute quant à la *visée programmatique* de sa requête : *renommer les disciplines va de paire avec des recompositions disciplinaires en cours et/ou qu'il appelle de ses vœux*. Dans la mesure où sa lettre de 1946 est adressée à *Weather*, elle s'adresse en premier lieu aux météorologistes chargés de comprendre le temps ou de le prédire. Quelques mois plus tôt, le même S. Chapman a proposé à un public scientifique plus large, les lecteurs de *Nature*, le terme « géonomie » (*'geonomy'*) pour désigner les « sciences de la Terre ».[85] (Certains auteurs attribuent également à Chapman la paternité du terme

---

de l'ozone), ce seront les physiciens-astronomes seuls qui reprendront – et encore, "mollement" –, le flambeau de la théorisation de la chimie de l'ozone stratosphérique allumé par leur pair Sydney Chapman.

[85] Chapman, 1946 :

> "In a recent letter to *Nature* I have suggested the use of *geonomy* as a comprehensive word (on the model of *astronomy*) for the earth sciences, to cover at least geology, geography, geophysics (in all its branches), geomechanics, and so on. […] I trust it will take the place of the increasingly common phrase "the earth sciences". […]
>
> "The words *astronomy* and *geonomy* finally led me to recognize in *aeronomy* a possible substitute for *meteorology*. *Aeronomy* is not in use, so far as I know, for any other purpose; it is general in its significance; by derivation it can, on the model of *astronomy*, cover the whole science of the earth's atmosphere". [Chapman, 1946, p. 146]

« géomagnétisme » [*Northwest Digital Archives' website*, 2012]). Dans les deux cas, l'intention de Chapman est d'*engager la fédération de divers courants d'études sur l'atmosphère ou sur l'objet Terre, ou tout le moins d'encourager le dialogue entre eux*. [Chapman, 1946, p. 146]

Au vu des difficultés de réconciliation entre météorologie dynamique et prévision du temps, ou d'intégration des études aérologiques ou spectroscopiques sur l'ozone dans la météorologie, on est en droit de questionner la pertinence d'une telle requête. Pourtant, *les nouveaux types d'étude sur l'atmosphère qui apparaissent à la fin du XIX*ème *siècle possèdent bel et bien des points de contact avec la météorologie (et même avec la prévision du temps)*. D'abord, les différents types d'étude sur l'atmosphère partagent des objets atmosphériques "évidents" (vents, météores, éclairs, *etc.*) et des méthodes "traditionnelles" de quantification (à l'aide de baromètres, de thermomètres, *etc.*). Les scientifiques spécialisés dans l'étude de l'atmosphère partagent une partie de leur littérature. On en trouve par exemple des preuves dans les échanges de méthode entre les météorologistes anglais L.F. Richardson (1881-1953) et W.H. Dines (1855-1927), au tournant des années 1920. La méthode arithmétique de résolution des équations différentielles mise au point par le premier pour la prévision du temps est reprise par le second dans son « important article » de 1920 sur « la radiation atmosphérique et terrestre », rapporte F. Nebeker. [Platzman, 1967, p. 540 **in** Nebeker, 1995, pp. 80-81]

En outre, l'intégration des *paramètres radiatifs* dans la météorologie, comme c'est le cas dans les articles de W.H. Dines dès les années 1910, est particulièrement décisive dans l'évolution de la discipline météorologie, en même temps qu'elle lance une passerelle entre les météorologistes et les scientifiques qui tentent de raffiner leur théorie sur la composition de l'atmosphère.[86] Expliquer les températures aux différentes altitudes, le « contenu en vapeur

[86] La *redéfinition radiative* de certains paramètres clefs de la *météorologie*, constitue l'une des principales "révolutions" au sein des sciences de l'atmosphère. Elle doit beaucoup à la redéfinition du *climat global* en termes de bilan radiatif global, et aux études des géophysiciens qui en découlèrent. Des historiens des sciences de l'atmosphère tels que James Fleming ont identifié les premières figures de cette double révolution scientifique, aux premiers rangs desquelles on trouve Joseph Fourier et John Tyndall :

> "In the middle decades of the nineteenth century John Tyndall (1820-1893), an Irish-born scientist and consummate experimentalist at the Royal Institution of Great Britain, worked on the radiative properties of various gases, demonstrating that "perfectly colourless and invisible gases and vapours" (Tyndall, 1858-1862) were able to absorb and emit radiant heat. […] Specifically, he established beyond a doubt that the radiative properties of water vapor and carbon dioxide were significant factors in explaining meteorological phenomena such as the formation of dew, the energy of the solar spectrum, and, possibly, the variation of climates over geological time."
>
> "The carbon dioxide content of human lungs and in regional air samples was also a focus of Tyndall's investigations. On a more cosmic level, Tyndall thought that changes in the amount of any of the radiatively active constituents of the atmosphere – water vapor, carbon dioxide, ozone, or hydrocarbons – could have produced *"all the mutations of climate which the researches of geologists reveal*… they constitute true causes, the *extent* alone of the operation remaining doubtful. Tyndall gave credit to his predecessors, including [Joseph] Fourier, for the intuition that "the rays from the sun and fixed stars could reach the earth through the atmosphere more easily than the rays emanating from the earth could get back to space"." [Fleming, 2007(c)]

d'eau », ou potentiellement n'importe quelle concentration gazeuse, implique à présent de connaître les paramètres radiatifs de l'atmosphère. Les études radiatives des astronomes et géologues se prolongent à présent dans les tentatives des météorologistes d'intégrer des variables radiatives à leur science (en particulier, le coefficient d'absorption (radiative) des gaz), à des niveaux plus ou moins fondamentaux, afin d'expliquer la formation des nuages, les différentiels de températures responsables de la dynamique des masses d'air, *etc.*[87]

On peut, en outre, souligner les rencontres entre la formalisation des masses d'air et les études nouvelles sur la moyenne atmosphère, dans les années 1910-20. Comme nous l'avons évoqué plus haut avec les mots de Dobson, les météorologistes s'intéressèrent précocement à la météorologie propre à la stratosphère, d'une part, et d'autre part aux corrélations des dynamiques cycloniques (dépressions) et anticycloniques avec le différentiel de température entre troposphère et stratosphère (la température élevée de la stratosphère étant partiellement à imputer à ses concentrations importantes en ozone) et/ou avec un taux circonstanciel d'ozone dans la stratosphère ou dans la haute atmosphère (*cf.* les travaux de Dines, de Lindemann et de Dobson, décrits dans le Sous-chapitre 2.1).

Enfin, les constantes et lois radiatives ont pris de l'importance lorsque, à la fin du XIX^{ème} siècle, la théorisation des cycles naturels des ères glaciaires est devenue une question importante, à laquelle on a répondu, non seulement par les variations des taches solaires et les évolutions de la trajectoire de la Terre autour du Soleil et de la position de la Terre sur

---

Au tournant du XX^{ème} siècle, le débat sur les causes de l'avènement d'ères glaciaires, dont l'hypothèse d'une influence des émissions anthropiques de CO_2 sur le climat global, apporta une eau nouvelle au moulin des études sur les propriétés radiatives des composés atmosphériques. Les débats collégiaux furent particulièrement riches au sein de l'Académie Royale des Sciences de Suède, en particulier entre Svante Arrhenius et Nils Ekholm. Des météorologistes, en outre, participèrent de manière décisive aux discussions sur les changements climatiques globaux. Ainsi, Guy Callendar formula à la fin des années 1930 une théorie de l'effet de serre proche de celle des sciences du changement climatique d'aujourd'hui (elle fut nommée « effet Callendar » ; au sujet de Callendar, voir sa biographie par J. Fleming – Fleming, 2007(c)). Enfin, la structure de l'atmosphère en couches aux profils de température différents pouvait s'expliquer par la composition chimique de ces régions :

> "The use of sounding balloons in the years around 1900 gave evidence that above 10 km or so there was little change of temperature with height. It had long been known that at lower levels the temperature fell off rather uniformly with height. The new evidence was more readily believed after Ernest Gold's 1909 demonstration that such a change of temperature regime is a direct consequence of the laws of radiation and some reasonable assumptions about the content of water vapor and carbon dioxide in the upper atmosphere." [Brunt, 1951, p. 120 **in** Nebeker, 1995, p. 107]

[87] Alors que chez V. Bjerknes, les « sept quantités » auxquelles réduire l'atmosphère sont les trois directions du vent, la pression, la température, la masse volumique de l'air et son contenu en vapeur d'eau, d'autres travaillent bientôt autour du concept de *coefficient d'absorption (radiative) des gaz*, importé du champ de l'optique de laboratoire pour être appliqué aux gaz atmosphériques. Cette grandeur exprime la diminution relative de l'intensité d'un rayonnement lors de la traversée d'un gaz atmosphérique. Les mesures de coefficient d'absorption de la vapeur d'eau, du CO_2 et de l'ozone offrent ainsi un nouveau programme de recherche à la météorologie, à partir des années 1920. Toutefois, les difficultés "d'application" de la physique des interactions radiations-gaz à l'atmosphère étaient réelles. Par exemple, G.C. Simpson se plaignait des obstacles insurmontables qui avaient émergé lors de ses déterminations empiriques de l'absorption et de l'émission de radiations électromagnétiques dans l'atmosphère terrestre :

> "No branch of atmospheric physics is more difficult than that dealing with radiation. This is not because we do not know the laws of radiation, but because of the difficulty of applying them to gases" of the atmosphere. (Simpson therefore stimulated a program of "careful measurements of the absorption coefficients of water vapor" – *cf.* Walter Elsasser's work) [Simpson, 1928, p. 70 **in** Nebeker, 1995, p. 108; Nebeker, 1995, p. 109]

son axe, mais également par les propriétés radiatives de l'atmosphère (gaz à effet de serre, aérosols). En définitive, entre le milieu du XIX^{ème} siècle et la Seconde guerre mondiale, des tentatives de *redéfinition radiative* de l'ensemble de l'atmosphère ont été menées, par le biais d'un travail sur les propriétés radiatives des gaz et des solides atmosphériques.

Soulignons pour finir que, au début du XX^{ème} siècle, la météorologie ne converge pas uniquement avec les études astronomiques de la haute atmosphère par le biais du paradigme radiatif mais également *sur le plan des échelles*. Le travail du météorologiste suédois-états-unien Rossby à la fin des années 1930 est sur ce point déterminant. Sa formalisation d'ondes planétaires – des mouvements de circulation atmosphérique planétaire ondulatoires de grande longueur d'onde soumis à la force de rotation de la Terre (ou force de Coriolis), finalement rebaptisées « ondes de Rossby » –, en particulier, n'a pas uniquement opéré un rapprochement entre les pratiques de prévision du temps et la théorie physique appliquée à l'atmosphère, mais également établi « pour la première fois », affirmera le météorologiste états-unien Jule G. Charney (1917-81), son héritier et collègue quelques années plus tard, « une théorie dynamique […] dans laquelle les propriétés 'planétaires' caractéristiques de l'atmosphère étaient prises en compte » [Charney, 1950, p. 234 **in** Nebeker, 1995, p. 90].

Le rejet de la proposition de Chapman par les météorologistes, et la nouvelle acception du mot aéronomie. Une atmosphère coupée en deux.

Revenons à présent sur la proposition de S. Chapman de réunir les études sur l'atmosphère sous le terme « aéronomie ». Elle ne soulève pas l'enthousiasme. On pourrait penser que la photochimie de l'atmosphère laisse perplexe les météorologistes. C'est le cas !, toutefois, lorsque Chapman fait en 1946 le constat que « la météorologie recouvre à présent « la mécanique et la chimie, ainsi que la physique de l'atmosphère », il ne parle pas de la chimie au sens où nous l'entendons (comme photochimie, chimie gazeuse, *etc.*), mais comme composition de l'atmosphère (sans se soucier de la potentielle réactivité chimique de cette dernière) [Chapman, 1946, p. 146]. L'incommensurabilité des savoirs sur l'atmosphère entre météorologistes et astronomes-géophysiciens réside en fait en grande partie dans *les multiples différences d'instruments, de méthodes, de concepts et d'objectifs qui les séparent*.

En effet, un programme commun multi-échelle, de préférence à fort enjeu politique, fait défaut. Comme nous le verrons dans les chapitres suivants, les militaires en financeront de nombreux de ce type pendant la Guerre froide ; en outre, les études sur les pollutions chimiques régionales dans la vaste agglomération de Los Angeles conduiront à une petite montée en échelle des études sur les pollutions de l'air urbain dans les années 1950 ; puis,

dans les années 1970, les études pour tester les hypothèses de destruction anthropique de l'ozone stratosphérique associeront des spécialistes de l'ozone troposphérique (tradition locale et régionale) et stratosphérique (tradition globale). Enfin, la thématique du changement climatique intéressera les élites états-uniennes des sciences de l'atmosphère (parce que cette problématique leur permettait de ne plus être confinées seulement dans des études belligérantes, et parce qu'elle nécessitait une approche transdisciplinaire, dont ces élites s'étaient férues [Hart & Victor, 1993]. A l'inverse, dans la première moitié du XX^{ème} siècle, la science du changement climatique global, initiée par les géologues à la fin du XIX^{ème} siècle autour d'hypothèses radiatives sur le CO_2, la vapeur d'eau et l'O_3 stratosphérique voire les aérosols, d'une part, et de la capacité de régulation thermique des océans, d'autre part, intéresse encore peu les météorologistes.

De plus, l'atmosphère est tiraillée entre basse et haute atmosphère, qui possèdent chacun ses spécialistes. Malgré "l'universel" paradigme radiatif, il n'existe pas encore de cadre formel, de programme ambitieux et de personnalités capables de réunir en une unique science de l'atmosphère des phénomènes de la haute atmosphère, étudiés par les astronomes et géophysiciens, et des phénomènes de la basse atmosphère, étudiés par les météorologistes et les chimistes. En définitive, peu nombreux sont ceux qui suivent l'exemple d'éclectisme donné par Chapman, qui produit à la fois des travaux sur la diffusion dans l'atmosphère terrestre, sur la photochimie de l'oxygène et de l'ozone, sur les marées et oscillations atmosphériques, *etc.* L'atmosphère demeure disciplinairement très compartimentée. La césure demeure, entre une science des dynamiques physiques des masses d'air, presque exclusivement consacrée à la basse atmosphère, et un champ étude sur les transformations des composés atmosphériques par dissociation, photochimiques notamment, ainsi que les transformations par ionisation, rendant compte de phénomènes dans la haute atmosphère – tout comme il existe par ailleurs alors une séparation peu poreuse entre météorologie et la science du changement climatique. En corollaire, les météorologistes vont rejeter la proposition de Chapman.[88]

Par défaut, Chapman en personne propose bientôt de réduire l'acception de son terme « aéronomie », pour le limiter à une « science de cette partie de l'atmosphère supérieure "où la dissociation et l'ionisation deviennent importantes". »[89] Huit ans après avoir proposé en

[88] Nous n'avons pas trouvé de réponse à la lettre de Chapman dans les numéros suivants du journal *Weather*. Haurwitz et Fogle, biographes de Chapman, se contentent quant à eux de constater, laconiques, que sa « suggestion ne fut pas acceptée par les météorologistes ». [Haurwitz & Fogle, 1968]

[89] Depuis, les objets d'étude des aéronomes et la définition de leur science n'a guère évolué. L'aéronomie a conservé le caractère multidisciplinaire voulu dès l'origine par son créateur. De nos jours, l'*Encyclopédie Universalis* définit l'aéronomie comme suit :

vain une acception large de l'aéronomie aux météorologistes, le géophysicien officialise sa nouvelle et restreinte définition. Lors de la dernière session plénière de l''International Association of Terrestrial Magnetism and Electricity', qui se tient à Rome en 1954, S. Chapman prononce sous le contrôle de ses pairs géophysiciens et astronomes la fin de ladite institution, qui devient l''International Association of Geomagnetism and Aeronomy'. S'il était « impossible de séparer les contributions de Chapman aux champs de la météorologie et de l'aéronomie » (telle que redéfinie) puisqu'ils « se superposaient » dans ses travaux, Chapman faisait figure d'exception. Une telle séparation disciplinaire entre sciences de la haute et de la basse atmosphères se justifiait aux yeux de la plupart des scientifiques qui étudiaient l'atmosphère dans les années 1950. [Haurwitz & Fogle, 1968 ; Nicolet, 1968 **in** Akasofu *et al.* (eds.), 1968]

L'atmosphère demeure donc coupée en deux. A l'image du monde supralunaire, qui chez Aristote obéit à une ontologie autre que le monde sublunaire, la haute atmosphère du milieu du XX^{ème} siècle (de nature globale *a priori*) est presque totalement découplée de l'atmosphère proche du sol terrestre (où se déroulent des phénomènes locaux et régionaux de déplacement de masses d'air, mais aussi des phénomènes radiatifs régionaux ou globaux, liés à la présence de gaz à effet de serre et d'aérosols). Ceci se manifeste de manière patente dans la différence entre phénomènes étudiés : magnétisme, photochimie, ionisation, ondes électromagnétiques, *etc.*, pour la haute atmosphère ; vents, pluies, nuages, aérosols, polluants industriels, *etc.*, dans la basse atmosphère.

La frontière entre communautés demeure encore marquée dans les travaux contemporains sur l'atmosphère. Toutefois, elle était plus hermétique avant les années 1940, et même jusqu'aux années 1970 ; et ceci, à deux niveaux. D'une part, peu de liens épistémologiques relient alors troposphère et stratosphère. D'autre part, les méthodes des chercheurs de la troposphère et celles des chercheurs de la stratosphère sont alors très dissemblables, et les coopérations rares, faute de programme commun.[90]

> « L'aéronomie a pour objet l'étude des régions atmosphériques où les phénomènes de dissociations moléculaires et d'ionisation sont importants. Cette définition s'applique aussi bien à l'atmosphère terrestre qu'aux atmosphères planétaires. […] L'aéronomie est avant tout une science multidisciplinaire dans laquelle la physique, la chimie, la mathématique et la technologie spatiale ont chacune une place appréciable. » [*Encyclopaedia Universalis*, 2011, « aéronomie »]

[90] Comme nous le montrons dans la suite de la thèse, les scientifiques de l'atmosphère trouveront des programmes communs dans la météorologie à grande échelle, qui prend son envol au sein des sciences pour la guerre des années 1940-60, et surtout dans le programme environnemental sur l'atmosphère globale à partir des années 1970. Les études sur la physico-chimie de l'ozone joueront un grand rôle dans le décloisonnement entre les deux sphères. Dans les années 1960-70, météorologistes et astronomes-aéronomes, mais aussi chimistes des pollutions et astronomes-aéronomes vont en effet se retrouver autour des questions des échanges physico-chimiques entre troposphère et stratosphère, ainsi qu'autour des outils théoriques et méthodologiques à mobiliser pour modéliser la (photo-)chimie de la troposphère et de la stratosphère. A partir des années 1980, les études sur la destruction de l'ozone stratosphérique et sur la pollution troposphérique industrielle seront de plus en plus volontiers classées sous l'appellation "chimie atmosphérique", qui se trouve adoptée par des journaux scientifiques voire pour des formations universitaires. Enfin, la frontière deviendra plus poreuse encore lorsque seront couplés épistémologiquement les

Une proposition de cartographie de la recherche sur l'atmosphère dans les années 1920-30

Au début du XX^{ème} siècle, les scientifiques qui étudient l'atmosphère ont principalement recours à deux outils théoriques : *la physique post-newtonienne* ; *la statistique* (l'un de ses pères, Adolphe Quetelet, consacrera d'ailleurs de longues années (1845-1853) à la rédaction d'un important ouvrage *Sur le climat de la Belgique*). Ils se réclament pour la plupart, soit de la *météorologie dynamique*, soit de la *tradition de la prévision du temps*, soit de la *climatologie*. Cette dernière s'enseigne à présent dans les universités (par exemple, Robert DeCourcy Ward publie en 1903 sa traduction anglaise du Volume 1 du *Manuel de Climatologie* de Hann, qu'il utilise comme ouvrage de référence de son cours de « Climatologie Générale » à l'Université d'Harvard).

Dans sa version traditionnelle, synonyme de « météorologie descriptive », la climatologie se distingue doublement de la météorologie dynamique. D'abord, elle est principalement inductive (et non, déductive). Ensuite, la climatologie obéit souvent à des échelles de temps et d'espace, certes plus faibles que celles des sciences du changement climatique global, mais plus importantes que celles de la météorologie dynamique. De rares échanges entre la climatologie et la météorologie dynamique (voire la prévision du temps) vont néanmoins s'opérer, dans les conditions épistémologiques particulières où les échelles de temps et d'espace se resserrent, ou lorsque des connexions entre la climatologie et la météorologie théorique (voire la prévision du temps) vont s'opérer.[92]

---

deux risques "atmosphériques" globaux, l'un "stratosphérique", la destruction de la couche d'ozone, et l'autre principalement "troposphérique", le changement climatique opéré par les gaz à effet de serre et les aérosols – couplage qui est réalisé dès les années 1970, mais occupe une place importante dans la littérature scientifique seulement à partir des années 1990. Parallèlement à ces rencontres entre scientifiques de la basse atmosphère et de la moyenne atmosphère (voire de la haute atmosphère), le terme aéronomie est peu à peu tombé en désuétude, même s'il demeure encore utilisé aujourd'hui, dans la mesure où la plupart des phénomènes de la haute atmosphère ne sont toujours corrélés, ni au changement climatique, ni aux pollutions toxiques émises par l'homme.

[92] Nebeker écrit que *la plupart* des lois climatologiques étaient inductives, et non toutes

> Here's an example: "In a 1924 book entitled *Climatic Laws*, Stephen Visher, an American professor of geography, presented 25 meteorological laws and 90 climatological laws. Many of the meteorological laws, came from physics, but most of the climatological laws came directly from a study of data."

On voit par là que le caractère inductif *vs* déductif n'est pas l'unique et nécessaire caractère discriminant entre climatologie et météorologie.

En outre, une divergence des échelles de temps et d'espace s'est opérée au cours du XIX^{ème} siècle, au fil de la constitution de ces deux sciences. La temporalité de référence de la climatologie est souvent de l'ordre de plusieurs décennies, afin de pouvoir établir des régularités annuelles, et la délimitation territoriale est souvent coextensive au pays du scientifique qui définie le climat (Ex : *la Climatologie de la Belgique* de Quetelet (1845-1853), *la Climatologie des Etats-Unis* de Lorin Blodget (1857), *du Climat de la Russie* de K.S. Veselovskii (1857)). A.I Voeikov s'essaiera même à décrire l'ensemble des *Climats du monde* (1884). Cette science est pratiquée par des scientifiques d'origine diverse : météorologistes-physiciens (Ex : Julius Hann), mais aussi géographes (Ex : Visher), statisticiens (Ex : Quetelet), chimistes (dans la lignée de la 'Chemical Climatology' de Smith, 1872). Précisons que cette multidisciplinarité s'explique par la jeunesse de cette science, ainsi que par la faible spécialisation des scientifiques à l'époque, et non par quelque désir de fonder une science de l'atmosphère la plus généraliste possible.

Quant aux lois météorologiques, elles sont pensées comme universelles. Certains, de Bjerknes à Rossby en passant par Richardson, chercheront à *associer météorologie dynamique et prévision du temps* (à faible échelle, donc), entre 1920 et 1940. Par contre, la climatologie n'est guère accessible aux théoriciens de la météorologie dynamique, dans la

L'autre voie principale d'extension des savoirs météorologiques est ouverte par l'*aérologie*, qui se développe à partir de la toute fin du XIX^{ème} siècle. Au cours de la première moitié du XX^{ème} siècle, une expansion verticale du domaine de savoir atmosphérique se développe, par le biais d'études expérimentales *in situ* (ballons, cerfs-volants, puis avions, missiles et fusées) de la troposphère et de la stratosphère, ou "aérologie", entreprise par des chimistes, des météorologistes ou des passionnés de vols aéroportés, ainsi que par le biais de mesures spectrométriques réalisées par des astronomes. De plus, les trajets de masses d'air en haute altitude ont une extension géographique importante. Et, l'idée de formaliser les interactions physiques de l'atmosphère à l'échelle globale fait son chemin, à partir des années 1930 (*cf.* les travaux de Rossby). Enfin, alors que pour les sciences de la haute atmosphère les aspects de composition et de dissociation physique et chimique des composés atmosphériques avaient, dans un premier temps, primé sur les questions de dynamique atmosphérique, des passerelles sont lancées entre météorologie et sciences de la haute atmosphère. Les propriétés radiatives des gaz ozone, dioxyde de carbone et vapeur d'eau offrent le principal programme de recherche commun aux météorologistes et aux astronomes-géophysiciens. La présidence de la 'Royal Meteorological Society' britannique par S. Chapman, en 1932 et 1933, témoigne d'un début d'ouverture réciproque des deux communautés.

La Figure 10, ci-dessous, propose *une cartographie de la recherche sur l'atmosphère dans les années 1920-30. Elle rend compte des recherches transdisciplinaires sur l'atmosphère existant alors… recherches qui, comme nous l'avons montré, n'induisent néanmoins pas de reconfigurations disciplinaires décisives.*

---

première moitié du XX^{ème} siècle. Malgré des tentatives d'application à la climatologie, les lois de la météorologie dynamique demeureront souvent incapables d'expliquer les régularités annuelles. Les climatologues élaborent souvent leurs propres lois. Ainsi, Wladimir Köppen, qui s'ingénia à classifier les climats, à l'aide d'équations empiriques (qu'il n'eut de cesse de réviser entre 1884 et 1931) :

> "In his 1918 version he *defined the climatic types quantitatively*; for example, the border between a steppe climate and a neighboring moist climate was defined to be the locus of points for which $r = 0.44\ t - 8.5$, where r is the rainfall in inches and t is the temperature in degrees Fahrenheit. [… More importantly, such empirically discovered regularities] soon became valuable explanatory resources for scientists – botanists, zoologists, geologists, sociologists, and others – and proved of practical value, especially for agriculture and commerce [… Finally,] this empirical tradition was further strengthened by its *connections with theoretical meteorology and weather forecasting*" especially after 1920. [Nebeker, 1995, pp. 24-26; c'est nous qui soulignons].

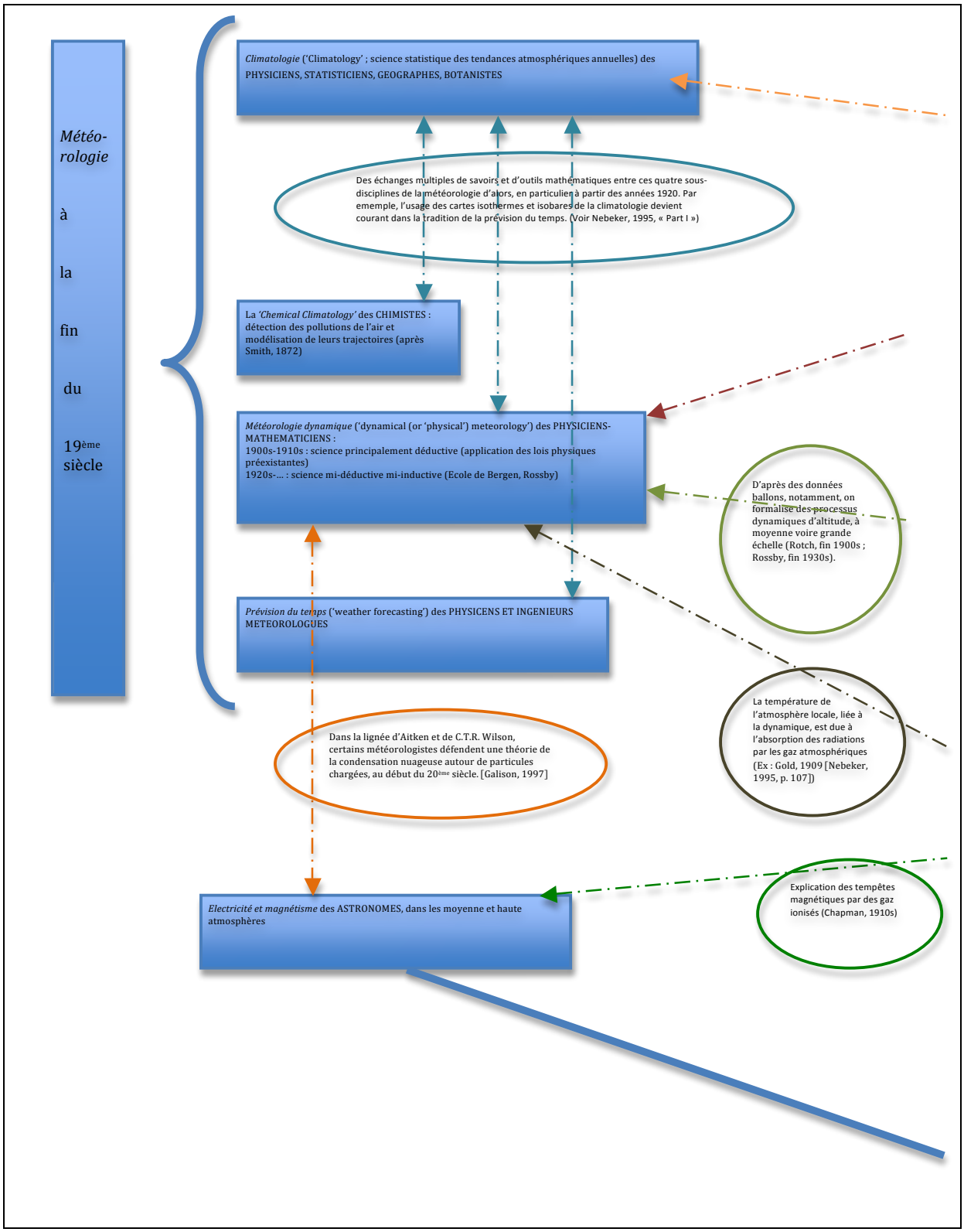
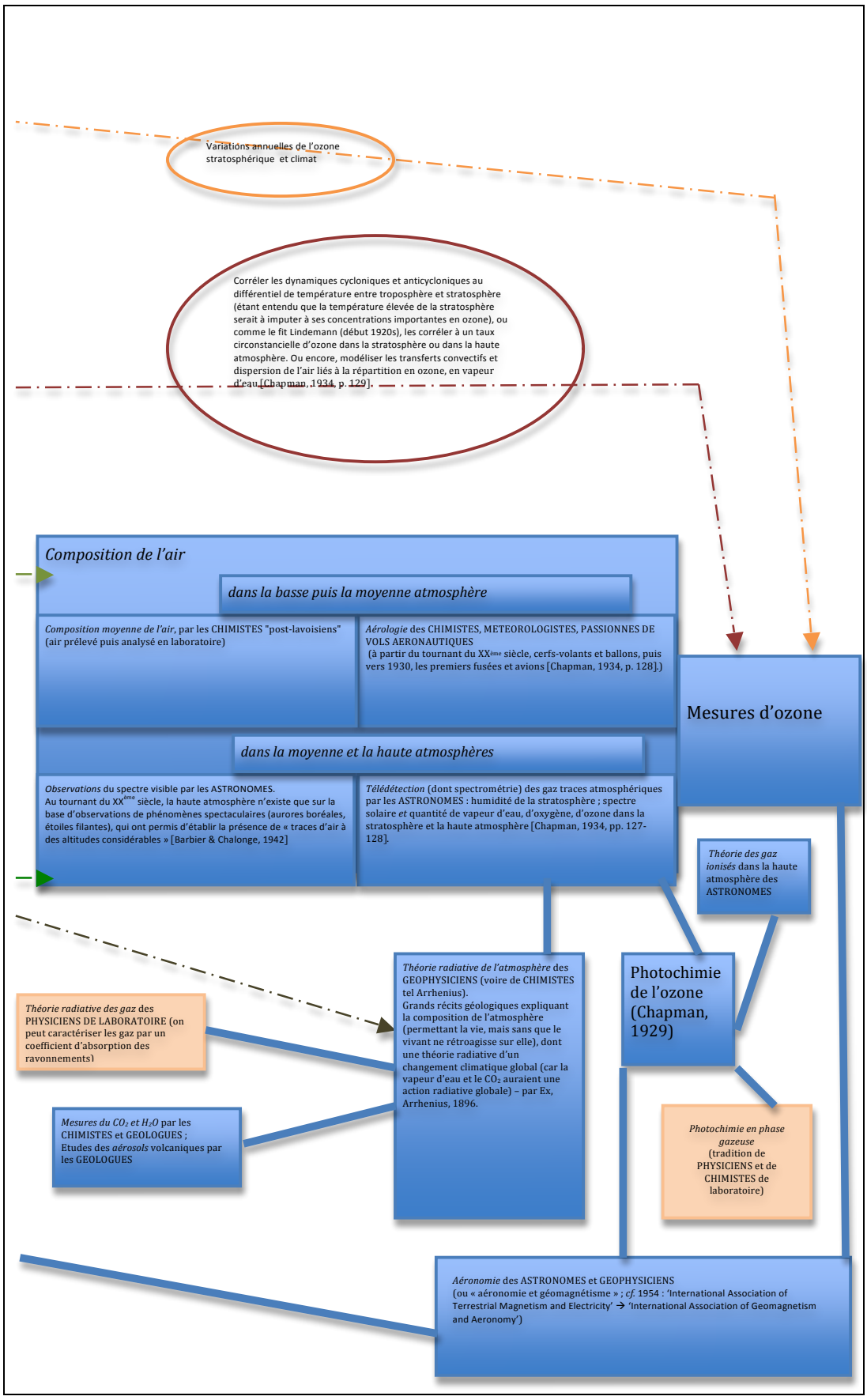


Figure 10 : *Programmes d'étude de l'atmosphère* et COMMUNAUTES DISCIPLINAIRES ENGAGEES, dans la première moitié du XX^{ème} siècle


Variations annuelles de l'ozone stratosphérique et climat
Corréler les dynamiques cycloniques et anticycloniques au différentiel de température entre troposphère et stratosphère (étant entendu que la température élevée de la stratosphère serait à imputer à ses concentrations importantes en ozone), ou comme le fit Lindemann (début 1920s), les corréler à un taux circonstancielle d'ozone dans la stratosphère ou dans la haute atmosphère. Ou encore, modéliser les transferts convectifs et dispersion de l'air liés à la répartition en ozone, en vapeur d'eau [Chapman, 1934, p. 129].
Composition de l'air
dans la basse puis la moyenne atmosphère
Composition moyenne de l'air, par les CHIMISTES "post-lavoisiens" (air prélevé puis analysé en laboratoire)
Aérologie des CHIMISTES, METEOROLOGISTES, PASSIONNES DE VOLS AERONAUTIQUES (à partir du tournant du XXème siècle, cerfs-volants et ballons, puis vers 1930, les premiers fusées et avions [Chapman, 1934, p. 128].)
dans la moyenne et la haute atmosphères
Observations du spectre visible par les ASTRONOMES. Au tournant du XXème siècle, la haute atmosphère n'existe que sur la base d'observations de phénomènes spectaculaires (aurores boréales, étoiles filantes), qui ont permis d'établir la présence de « traces d'air à des altitudes considérables » [Barbier & Chalonge, 1942]
Télédétection (dont spectrométrie) des gaz traces atmosphériques par les ASTRONOMES : humidité de la stratosphère ; spectre solaire et quantité de vapeur d'eau, d'oxygène, d'ozone dans la stratosphère et la haute atmosphère [Chapman, 1934, pp. 127-128].
Mesures d'ozone
Théorie des gaz ionisés dans la haute atmosphère des ASTRONOMES
Théorie radiative de l'atmosphère des GEOPHYSICIENS (voire de CHIMISTES tel Arrhenius). Grands récits géologiques expliquant la composition de l'atmosphère (permettant la vie, mais sans que le vivant ne rétroagisse sur elle), dont une théorie radiative d'un changement climatique global (car la vapeur d'eau et le CO_2 auraient une action radiative globale) – par Ex, Arrhenius, 1896.
Photochimie de l'ozone (Chapman, 1929)
Théorie radiative des gaz des PHYSICIENS DE LABORATOIRE (on peut caractériser les gaz par un coefficient d'absorption des rayonnements)
Mesures du CO_2 et H_2O par les CHIMISTES et GEOLOGUES ; Etudes des aérosols volcaniques par les GEOLOGUES
Photochimie en phase gazeuse (tradition de PHYSICIENS et de CHIMISTES de laboratoire)
Aéronomie des ASTRONOMES et GEOPHYSICIENS (ou « aéronomie et géomagnétisme » ; cf. 1954 : 'International Association of Terrestrial Magnetism and Electricity' → 'International Association of Geomagnetism and Aeronomy')

Chapitre 2. *1940-1970*. La stratosphère nouvelle des sciences belligérantes

Les historiens des sciences de la Seconde Guerre Mondiale et de la Guerre Froide ont décrit les Etats-Unis des décennies 1940-60 comme le lieu de naissance d'une recherche scientifique de nature nouvelle, au sein d'un « complexe universitaire-militaire-industriel ».[93] Parmi ses attributs, figurent des 'Big technologies' telles que les satellites et les ordinateurs, qui vont profondément modifier les pratiques des sciences de l'atmosphère, à présent lancées à l'assaut du globe aux côtés de la géodésie, de l'océanographie, de la sismologie [Edwards, 2010, p. 189]. Les premiers modèles numériques de météorologie et de simulation de l'effet de serre global apparaissent dans les années 1950. Les premiers modèles de chimie atmosphérique seront développés une dizaine d'années plus tard environ, et peineront dans un premier temps à intégrer efficacement la dynamique de transport des polluants, et plus généralement les mécanismes météorologiques dans leur ensemble.[94] Les scientifiques de

[93] Nous renvoyons notamment au numéro spécial "Earthly Matters. On the Cold war and the Earth sciences" de *Social Studies of Science*, Vol. 33, n°5 (2003).

En outre, au sein de l'ouvrage collectif *les Sciences pour la guerre. 1940-1960* (2004), Dominique Pestre offre une historiographie des travaux sur les sciences des années 1940-60, et rappelle les principales caractéristiques du « complexe universitaire-militaire-industriel des années 1940-50 » dégagées jusqu'alors par les historiens. Un « premier regard sur le complexe militaire-industriel-universitaire », jeté par des historiens des années 1980 et du début des années 1990 eut pour objet principal « les sciences physiques et biologiques » états-uniennes. Il a identifié le passage d'une recherche scientifique financée dans une part importante par les industries à une recherche scientifique presque exclusivement financée par l'Etat fédéral. 1939-45 est le théâtre d'une recherche « dont la finalité est la sécurité nationale », et où les « « gadgets » à vocation militaire » prolifèrent. Les années d'après-guerre prolongent la recherche nationaliste et finalisée. Certains « résultats de guerre sont déclassifiés et publiés dans les revues de physique. […] Utilisant l'expertise acquise durant la guerre, les physiciens américains « traduisent » alors leurs savoir-faire en dispositifs multiples – pour expérimenter avec *« des rayons X, des électrons, des positrons, des neutrons, des protons, des rayons gamma […] »*, ou appliquer les techniques de micro-ondes à la conception d'accélérateurs, à la résonance magnétique nucléaire, à la spectroscopie… et, en Angleterre et en Australie, à la radioastronomie. »

L'historiographie de Dominique Pestre décrit ensuite un « second regard », postérieur, sur le complexe militaire-industriel-universitaire. Il s'étoffe à partir des années 1990. Ces nouvelles études soulignent « l'émergence d'un autre ensemble de pratiques qui prend forme durant la guerre et la guerre froide » : la rationalisation des activités militaires accoucha en effet de nouvelles pratiques sociales des sciences (notamment au sein des 'think tanks'), ainsi que de nouvelles épistémologies propres à contrôler le corps social dans son ensemble (en sciences économiques, notamment). [Pestre **in** Dahan & Pestre, 2004, « Repenser les variantes du complexe militaire-industriel-industrie », pp. 195-205 & 206-219]

[94] Puis, au cours de la décennie suivante, les modèles numériques accroitront leur puissance de calcul, ce qui leur permettra de prendre en compte des données statistiques et d'intégrer des paramétrisations. Sur la genèse des modèles dits de "chimie-transport", voir notre Chapitre 5 pour les années 1970-80, et notre Chapitre 8 pour les années 1990-…

Sur les reconfigurations de la météorologie opérées par la modélisation numérique dans les années 1950-60, voir la Partie III de Nebeker, 1995 et le Chapitre 6 d'Edwards, 2010. Pour des études plus sociologiques ou anthropologiques autour de reconfigurations plus tardives qu'opérèrent les modèles dans les pratiques des

l'ozone devront attendre les années 1970 pour obtenir de premières mesures utiles depuis l'espace, à l'aide d'instruments co-développés par la NOAA et la NASA et disposés alternativement à bord de satellites NASA et NOAA. La première version de radiomètre BUV ('Backscatter UltraViolet') sera mise en orbite en avril 1970 à bord de Nimbus-4 ; mais, les informations qu'elle enverra ne seront plus jugées exploitables par les scientifiques dès juillet 1972 [Stolarski *et al.*, 1997] (même si elles seront ré-analysées dans les années 2000-10). Suivront des explorations plus fécondes à partir de 1978, année de mise sur orbite du premier radiomètre SBUV ('Solar Backscatter UltraViolet' ; NASA/NOAA) et du spectromètre à ozone TOMS ('Total Ozone Mapping Spectrometer' ; 1978), disposés tous deux à bord du satellite Nimbus-7.

La stratosphère n'en acquiert pas moins une importance stratégique dès les décennies 1940-60. Elle subit le déploiement de technologies destinées à évoluer en son sein, ou à la traverser pour atteindre la haute atmosphère ou l'espace. Les budgets exceptionnellement importants que les Etats en guerre mettent à disposition des géophysiciens et des scientifiques de l'atmosphère bénéficient ainsi à l'aéronomie, dont l'étude de la stratosphère. La météorologie et le climat stratosphériques deviennent des connaissances utiles aux militaires, dont les missiles (dont certains deviennent après-guerre des fusées météorologiques), les avions et les fusées spatiales atteignent à présent des altitudes où ils sont soumis à des phénomènes atmosphériques inédits. La composition de la stratosphère fait alors l'objet de programmes de recherche d'un nouveau type, avec un plus grand nombre de mesures *in situ*, et une extension des préoccupations au-delà des aspects ozone et vapeur d'eau.

Au cours des décennies 1940-60, des rencontres plus systématiques s'opèrent entre sciences météorologique, aéronomique et climatique, dans un contexte où celles-ci montent en outre en échelle géographiquement au sujet de phénomènes à court et moyen termes. Nous pensons notamment au transport des émissions radioactives issues des essais nucléaires, et à la question du changement climatique d'origine anthropique. La 'Big Technology' de la Guerre Froide (satellites, bombes atomiques, ordinateurs, moyens de communication rapides) joue un rôle certain dans la montée en échelle de la météorologie, et donc dans la rencontre des échelles météorologiques et climatiques, de même que dans la croyance dans la capacité de l'homme à affecter la stratosphère et le climat global. C'est au cours de cette période que naissent les conditions épistémologiques et sociales qui inciteront des

scientifiques de l'atmosphère, voir par exemple Guillemot, 2007(a) pour des laboratoires français dans les années 1990-2000, et Sundberg, 2007 pour l'Institut Météorologique de Stockholm au cours de la décennie 2000.

scientifiques à lancer des alertes publiques sur la destruction anthropique de la couche d'ozone et le changement climatique au cours des décennies 1970-80.

On peut voir dans ce "legs environnementaliste" des années 1940-60 une "ironie de l'Histoire", que de nombreux auteurs n'ont pas manqué de souligner. En effet, au cours de ces trois décennies, l'heure n'est pas aux politiques environnementales ambitieuses, comme en témoigne par exemple la mollesse des politiques de qualité de l'air en Europe et en Amérique du nord – politiques qui ne sauraient aller à l'encontre de l'impératif catégorique de relance économique par la consommation et la croissance…[95] Dans les Etats-Unis de l'après-guerre, la mobilisation consumériste se double bien sûr d'une mobilisation militaire. La plupart des scientifiques de l'atmosphère présents sur le sol américain œuvrent pour la défense des technologies et des troupes militaires *contre* une atmosphère vue comme un moyen, mais aussi un danger et une contrainte, ou se passionnent pour les techniques d'ingénierie atmosphérique… deux domaines hautement financés par les militaires.[96] Même la coopération internationale se cristallise principalement autour de la maîtrise des risques liés à la course à l'armement à laquelle s'adonnent les deux Blocs ; et, en tout cas, elle ne fait pas grand cas des potentielles menaces d'atteinte aux équilibres naturels, ou des problèmes de santé publique liés aux pollutions de l'air, qui sont vécues comme secondaires et/ou lointaines.

Parmi les technologies qui doivent combiner avec l'atmosphère figurent deux technologies-sœurs, qui sont aussi deux technologies duales (*i.e.* militaires et civiles), et qui furent deux technologies-évènements du XX^{ème} siècle : l'aviation et le vol aérospatial. Leurs développeurs durent apprendre à dompter la gravité, mais aussi les conditions météorologiques. Leur fiabilité, qui rimait avec sécurité nationale et prospérité économique, suscita un nombre colossal d'études sur l'atmosphère. En outre, aux côtés des télécommunications, l'aéronautique et l'aérospatiale contribuèrent largement à construire le

[95] Ainsi, à Londres et à Los Angeles, il faudra attendre les violents smogs (années 1950-début des années 1960) pour que des mesures de mitigation des pollutions significatives soient prises. Au sujet de la France, l'historien de l'environnement Stéphane Frioux fait rimer Trente Glorieuses avec « Trente Pollueuses ». *Cf.* son intervention au Colloque de l'EHESS « Une autre histoire des « Trente glorieuses » », 12 septembre 2011, Paris, intitulée « Contribution à une histoire des « Trente Pollueuses » : pollution de l'air et civilisation urbaine et industrielle en France dans les années 1950-1960 ». Voir également Bonneuil, Pessis & Topçu (dir.), 2013, *Une autre histoire des Trente Glorieuses. La France des années de croissance. 1945-1968*.

[96] Telle est en tout cas l'état de la recherche aux Etats-Unis. A titre d'exemple, la prestigieuse 'American Meteorological Society' (AMS), créée en 1919, n'est guère obnubilée par les questions de pollution industrielle, jusque dans les années 1960. Le *Journal of the Atmospheric Sciences* qu'elle édite ne publie presque aucune étude sur les pollutions troposphériques anthropiques autres que les rejets radioactifs des essais nucléaires. La revue est alors composée en majorité de travaux sur la moyenne et la haute atmosphère dont les enjeux militaires sont indéniables, pour peu que l'on jette un œil à l'origine de leurs financements – « US Air Force Research Division », « Geophysics Research Directorate of the Air Force Cambridge Research Directorate », *etc.*, auxquels il faut ajouter le MIT, dont les fonds proviennent parfois de contrats militaires.

Le constat semble valoir également pour l'URSS, mais la littérature en langue anglaise ou française demeure encore aujourd'hui très maigre.

« village global » que popularisa Marshall McLuhan, et jouèrent, enfin, un rôle symbolique majeur dans la mutation de notre rapport à l'environnement dans la seconde moitié du XX^{ème} siècle. Comme l'écrivent Alex Roland et P. Galison dans leur introduction au numéro spécial d'*Archimedes* sur « le vol atmosphérique au vingtième siècle », « la technologie que [les pionniers de l'aviation tels que les frères Wright] avaient inaugurée allait transformer les humains. Ces créatures jadis attachées [au sol] par la gravité, parcourant de manière précipitée le visage de la Terre, allaient devenir des explorateurs qui, partant en voyage dans l'espace, regarderaient derrière eux leur planète natale comme si elle était un artefact de l'histoire » [Galison & Roland, 2000 **in** Galison & Roland (Eds), 2000, "Introduction", p. viii].

Dernier point. Avec l'armée comme nouveau principal bailleur de fonds de la recherche atmosphérique et avec l'Europe en reconstruction, les pôles de la recherche atmosphérique se déplacent vers l'URSS, surtout vers les Etats-Unis. De nombreux scientifiques européens rejoignent aux Etats-Unis leurs compatriotes qui avaient fuit le totalitarisme et la guerre. La science de l'ozone, et plus généralement la science de la stratosphère, n'échappent pas à la règle. Si l'hégémonie de l'Europe dans la recherche sur l'ozone est incontestable jusqu'au sortir de la Seconde Guerre mondiale, comme en atteste la composition des conférences internationales sur l'ozone entre 1933 et 1948, la situation a radicalement changé à la fin des années 1950, avec une présence beaucoup plus importante des Soviétiques, et plus encore des Etats-Uniens. [Bojkov, 2010, pp. 16-35]

Ce Chapitre 2 forme un binôme avec le chapitre suivant. Le Chapitre 3 porte en effet, à peu de chose près, sur la même période. Alors que le Chapitre 3 analysera les recherches *internationales* dites "*pacifiques*" sur l'ozone et la stratosphère, le présent chapitre montre l'apport de programmes indubitablement *militaires* et *nationaux* – même si, comme nous le montrerons à plusieurs reprises, les deux "types" de recherche ne peuvent se laisser pleinement appréhender de manière indépendante. Notre étude de cas sur la recherche sur la stratosphère et l'ozone, exposée dans ces deux chapitres, complète les analyses menées par plusieurs historiens sur d'autres sciences atmosphériques de la Guerre froide, en particulier la météorologie à grande échelle et la science du changement climatique (*Cf.* Edwards, 2004 & 2010 ; Hart & Victor, 1993 ; Dörries, 2006 & 2011 ; Doel, 2003 ; Doel & Harper, 2006).

Le présent Chapitre 2 ne se limite pas à l'analyse de la seule science de l'ozone stratosphérique, mais à la science de la stratosphère en général, au cours des années 1940-60. Il a toutefois été pensé pour servir notre récit des études sur l'ozone, qui sont alors les seules à contribuer significativement à la formalisation de la chimie atmosphérique globale. Le chapitre est structuré thématiquement. Il s'attache à *montrer comment les études sur la stratosphère de la Seconde Guerre mondiale et des débuts de la Guerre froide, bien que financées pour*

une part importante afin de satisfaire des besoins belligérants, vont créer fortuitement des conditions de possibilité – épistémologiques et symboliques – d'alertes environnementales à la destruction de l'ozone à venir. D'abord, par le couplage de la stratosphère à des phénomènes qui se produiraient sur des échelles de temps très inférieures aux grands récits traditionnels des géophysiciens : la circulation générale et le changement climatique. Avec, pour conséquence, un nombre croissant de scientifiques commençant à envisager que l'environnement global puisse être affecté significativement par l'homme (2.1). Ensuite, par l'identification de ponts chimiques entre le sol et la stratosphère (2.2), ainsi que par la croyance des scientifiques dans la possibilité de "perturbations" (éruptions volcaniques, essais nucléaires, *etc.*) pouvant massivement et subitement affecter l'atmosphère à grande échelle (dont la couche d'ozone, pour certaines) (2.3). Enfin, nous discutons l'hypothèse d'une destruction chimique de la couche d'ozone par les gaz d'échappement des fusées, proposée dès 1962 par Harry Wexler, mais restée à l'état de brouillon (2.4).[97]

2.1. Le couplage de la stratosphère à la circulation générale de l'atmosphère et au climat global

Au cours de la Seconde Guerre mondiale, la stratosphère se retrouve traversée par des avions de combats et des missiles britanniques, allemands, américains et soviétiques. Puis, après-guerre, par des navettes spatiales. Les grandes puissances en guerre mobilisent leurs scientifiques pour servir une nouvelle météorologie nationale, sommée d'assurer la sécurité des technologies aéronautiques et aérospatiales dans leur environnement stratosphérique. Nous nous limiterons à deux exemples. Le premier, britannique, concerne les travaux d'Alan Brewer sous la direction de Gordon Dobson, pendant la Seconde guerre mondiale, avec pour enjeu la discrétion des vols des premiers avions militaires stratosphériques britanniques, qui dépend de l'hygrométrie de la stratosphère. Ces travaux mènent au premier couplage de la stratosphère à la circulation générale de l'atmosphère (Première section).

Le second exemple provient de la recherche militaire états-unienne dans les années 1950, qui cherche à sécuriser les vols des avions stratosphériques de l''US Air Force'. Ceci requiert une meilleure fiabilité des prévisions météorologiques. Elle passe notamment par le découplage de la météorologie de la stratosphère et de son climat, au travers de

[97] Nous insistons auprès du lecteur sur le fait que cette architecture du Chapitre 2 ne doit *pas* laisser penser que nous défendons que les travaux menés entre 1940 et 1970 conduisaient *nécessairement* à l'alerte à la destruction anthropique de l'ozone. Mais, qu'ils *contribuèrent* à changer le regard des scientifiques sur l'atmosphère globale et l'ozone stratosphérique, devenus potentiellement vulnérables à moyen terme voire à court terme.

l'étude du rôle radiatif de l'ozone et de la vapeur d'eau stratosphérique. En outre, l'ozone est couplé au climat global par son pouvoir radiatif, ainsi que par son influence sur la circulation générale. Nous montrons que le programme sur l'ozone demeure toutefois une problématique en retrait, alors que les programmes sur la météorologie à grande échelle prospèrent, et que la question du changement climatique d'origine anthropique tente de se frayer un chemin, parfois en se présentant comme nécessaire à d'autres programmes plus en vogue, comme l'ingénierie de l'atmosphère et du climat. Autre point central : ces travaux sur l'environnement à grande échelle ne sont pas le fait d'une nouvelle génération de chercheurs, mais réunissent des météorologistes-modélisateurs, des scientifiques des atmosphères planétaires et des océanologues d'élite, qui jouissent d'une grande autorité au sein de leur communauté scientifique et gravitent dans les sphères proches du pouvoir fédéral (Seconde section).

La circulation générale troposphérique-stratosphérique des météorologistes Brewer et Dobson

Lors du conflit avec l'Allemagne, la météorologie de la moyenne atmosphère devient un enjeu pour l'armée britannique. Les missiles atteignent des altitudes très élevées (le V2 allemand culmine à des altitudes proches de 100 km). Quant aux avions, ils deviennent aptes à effectuer des vols à des altitudes plus importantes, jusque dans la basse stratosphère. La prédiction du temps stratosphérique devient utile aux aviateurs militaires. En outre, si l'altitude de vol des avions stratosphériques les rend moins vulnérables aux batteries ennemies, il semble de surcroît qu'ils génèrent moins de traînées dans la stratosphère, donc sont moins aisément repérables depuis le sol. Mobilisé par l'armée britannique, le jeune météorologiste Alan Brewer (1915-2007) va confirmer ce phénomène et lui fournir une explication.

La première partie du récit qu'A. Brewer fera, cinquante ans plus tard, de ses années de travail au 'Meteorological Office' britannique durant la Seconde Guerre Mondiale, relate les mesures d'humidité dans la stratosphère qu'il réalisa sous l'autorité de Gordon Dobson. Embauché comme météorologue par le "Met Office" dès 1937 après l'obtention de son 'Master of Science', A. Brewer est enrôlé comme prévisionniste météo dans la 'Royal Air Force' dès les débuts du conflit avec l'Allemagne. En 1942, il est envoyé à 'Boscombe Down' dans une unité spéciale spécialisée dans les vols en haute altitude… unité qui s'avéra se résumer à lui seul ("a special unit, which was to be just me")! Au cours de sa mobilisation, le jeune météorologiste ne va toutefois pas demeurer tout à fait isolé de ses pairs scientifiques. Il va même faire deux rencontres collégiales de choix : avec Richard Goody, décrit comme « un diplômé récent de Cambridge […] s'intéressant à la

partie avionique », « un personnage roux qui s'avéra immensément utile » (Brewer et lui travailleront côte à côte jusqu'à la fin de la guerre) ; et, de manière plus décisive, avec Gordon Dobson, la personnalité de référence de la science de l'ozone atmosphérique dans le monde, toujours basé à Oxford. [Brewer, 2009 (1999), p. 18]

Lorsque G. Dobson commence à superviser le travail d'A. Brewer en 1942, le 'Fellow' de la 'Royal Society' a déjà compilé des mesures hygrométriques de la stratosphère depuis plusieurs années, grâce aux financements d'Oxford. Or, en temps de guerre, les mesures d'ozone revêtent une signification nouvelle, puisqu'elles peuvent aider à résoudre une énigme qui touche à la discrétion des vols des avions militaires du Royaume-Uni. A. Brewer raconte que, contre toute attente, « en pratique, les pilotes, inquiets, rapportaient qu'ils observaient des traînées [dans leur sillage] lorsqu'ils volaient à altitude modérée dans des régions où ils ne s'y attendaient pas ; par contre, ils n'observaient aucune traînée lorsqu'ils volaient à plus haute altitude, dans des régions où ils s'attendaient au contraire à les observer [(du fait de la température plus faible qui y règne, qui est propice à la formation de traînées de nuages de glace, ou « cirrus »)]. Or, cette divergence était très importante, poursuit Brewer. Lors d'un raid sur Nuremberg, nous avions perdu 93 avions, une perte absolument insupportable. […] Il était par conséquent essentiel que nous déterminions ce qui se passait. » Brewer et Dobson développent alors un hygromètre à point de gel, et font s'élever le 'Flying Fortress' à 37 000 pieds (soit près de 11 300 mètres). Pour la première fois, les deux météorologistes se trouvent physiquement dans la stratosphère. « A ma grande surprise, rapporte A. Brewer, alors que la température grimpait, le point de gel baissa, et aux plus grandes altitudes, je n'obtenais plus de dépôt. Nous utilisions du dioxyde de carbone solide comme réfrigérant et nous devions de toute évidence lui substituer à présent de l'oxygène liquide, ce que nous fîmes, mais il était net que la raison pour laquelle on n'observait pas de traînée dans la stratosphère était que l'air y était excessivement sec. Je n'aurais jamais pu penser que l'air y fût aussi sec avant de [faire l'expérience], mais je l'avais vu de mes propres yeux. J'eus [par la suite] beaucoup de difficulté à convaincre les gens que l'on pouvait effectivement mesurer cette sécheresse. » [Brewer, 2009 (1999), p. 18]

L'aviation stratosphérique, vieille de quelques années seulement, ne sera pas développée suffisamment rapidement pour constituer une arme décisive au cours de la Seconde Guerre Mondiale. Mais, une émouvante rencontre "physique" des scientifiques avec la stratosphère avait eu lieu au cours du conflit. Avec en prime, pour A. Brewer, la découverte inattendue du caractère « excessivement aride » de la stratosphère, qui non seulement encouragea le développement d'une flotte militaire capable de voler à très haute altitude, mais exigea également de reconsidérer la physique de la stratosphère. Afin de

concilier aridité de la stratosphère et mesures d'ozone stratosphérique, Brewer et Dobson vont en effet formuler un schème de circulation globale qui restera.

Pour Brewer et Dobson, la partie hygrométrique du travail est indissociable des mesures d'ozone. En effet, les concentrations d'ozone conditionnent le bilan radiatif de la stratosphère et donc sa météorologie. A cause de la présence d'un puissant "filtre ozone" dans la stratosphère, composition chimique et dynamique sont même plus fortement couplées dans cette région que dans la troposphère.

Suite aux étonnantes mesures hygrométriques de Brewer, Dobson recalcule la balance radiative de la stratosphère avec les nouvelles mesures d'humidité de son jeune collègue. Et, Brewer formule et parvient à imposer son hypothèse selon laquelle une partie de l'air et de l'ozone stratosphériques est générée dans le bas de la stratosphère équatoriale avant de s'élever. Ces trajectoires de masses d'air équatoriales sont combinées avec celles des parties polaires, que formalise de son côté Dobson. La description de Dobson "referme" la circulation d'ozone stratosphérique, en décrivant la descente de l'ozone vers la basse stratosphère au niveau des pôles, pour obtenir *in fine* un schème théorique de circulation stratosphérique globale. Connue aujourd'hui sous le nom de Circulation de Brewer-Dobson, cette représentation de masses d'air stratosphériques à l'échelle globale a évolué, entre celle de Brewer et Dobson pour des altitudes de 10 et 24 kilomètres environ au tournant des années 1950, et celles d'aujourd'hui, qui s'étend jusque dans la mésosphère (voir Figure 11 (c) *infra*). Dans leurs publications, Dobson et Brewer mettront surtout en avant le fait que, tout en préservant un bilan d'ozone global constant, leur modèle de circulation permettait d'expliquer le déficit d'ozone de l'air tropical par rapport à l'air polaire (alors que la stratosphère tropicale était pourtant le lieu principal de production d'ozone, du fait des forts apports radiatifs du Soleil dans cette région).[98] Ce travail avait, en tout cas, *couplé ozone et dynamique atmosphérique à grande échelle*…[99] Même si, affirme R. Bojkov, c'est seulement lors

[98] Aux yeux des scientifiques de l'atmosphère d'aujourd'hui, le travail de Brewer aurait plutôt porté sur des bilans de vapeur d'eau, et celles de Dobson sur des trajectoires d'ozone. Le témoignage de Brewer tend à indiquer que les travaux de Brewer et Dobson ne furent jamais produits indépendamment, les deux chercheurs prenant en compte dès le début dans leur raisonnement la vapeur d'eau et l'ozone.

[99] En outre, la première hypothèse d'une destruction anthropique de l'ozone (Harrison, 1970) incriminera les émissions de vapeur d'eau d'avions stratosphériques, c'est-à-dire un phénomène semblable à celui qu'avait étudié Brewer. Ce dernier ne fit, en revanche, jamais l'hypothèse d'une destruction anthropique de l'ozone. En revanche, son travail sur l'aridité de la stratosphère l'avait fait accéder au cénacle des scientifiques de l'ozone stratosphérique.

Brewer affirme avoir toutefois eu « beaucoup de mal » à convaincre Dobson et ses autres collègues de la pertinence de ses mesures dans la stratosphère (*"I had plenty of trouble with people convincing them that we could really measure that dryness"*) :

> "I would like to say about the 1949 paper that I knew very well that it was not in accordance with most people's views, and that it would be difficult to get published. Indeed, part of the paper was designed to be acceptable to the referees and the editor. It would have been very easy for the referees to rubbish it, and to say that I had no experience in this field, was out of touch and that the idea was ridiculous because it was widely recognised that the stratosphere was in radiative equilibrium [(what was still believed by some

de la Rencontre quadriennale sur l'ozone de l'ICSU, qui se tint à Albuquerque (Nouveau-Mexique) en septembre 1964, que la communauté scientifique prédit, « pour la première fois, que *l'influence* active *de l'ozone sur les dynamiques stratosphériques*, due à ses propriétés radiatives, allait à l'avenir prendre une place de plus en plus grande dans les études sur la circulation atmosphérique ». [Brewer, 2009 (1999), pp. 18-19 ; Brewer, 1949 ; Dobson, 1956; Bojkov, 2010, pp. 34-35]

Une remarque complémentaire, pour finir : au tournant des années 1970, A. Brewer posera les bases d'un nouveau spectromètre alternatif au 'Dobson'.[100]

specialists two decades later – *cf.* Murgatroyd, 1970), and not exchanging big quantities of heat with the troposphere]. I thank Reggie Sutcliff, who was the editor at the time, for it being published." [Brewer, 2009 (1999), pp. 18 & 20]

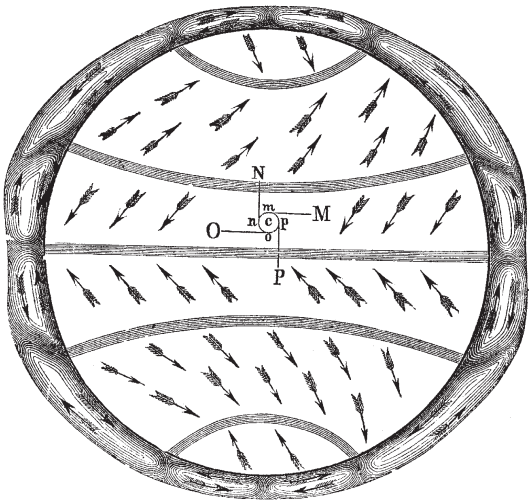
Bien que Brewer n'appartînt pas encore à l'élite des scientifiques de la stratosphère, son travail avait donc pu être publié en 1949 dans le *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*. Par la suite, il poursuivit ses mesures d'humidité de la stratosphère et ses mesures d'ozone à l'aide des spectrophotomètres de Dobson, jusqu'à devenir une figure reconnue de la petite communauté (il présidera l'IO3C entre 1967 et 1975).

[100] A. Brewer développera en outre un spectromètre, qui utilisera « des méthodes de mesures digitales [(numériques)]. Nous avions débuté ce travail [dès le tournant des années 1970, expliquera-t-il, avant que ne se pose pour la communauté] un autre problème stratosphérique », celui relatif aux impacts atmosphériques que généreraient une grande flotte civile d'avions supersoniques [Brewer, 2009 (1999), p. 20]. A partir de ces mesures, un article cosigné par Kerr et McElroy verra le jour au plus fort de la controverse scientifique sur la destruction de l'ozone par les NO_x émis par les avions civils supersoniques (Brewer *et al.*, 1973, "Nitrogen dioxide concentrations in the atmosphere").

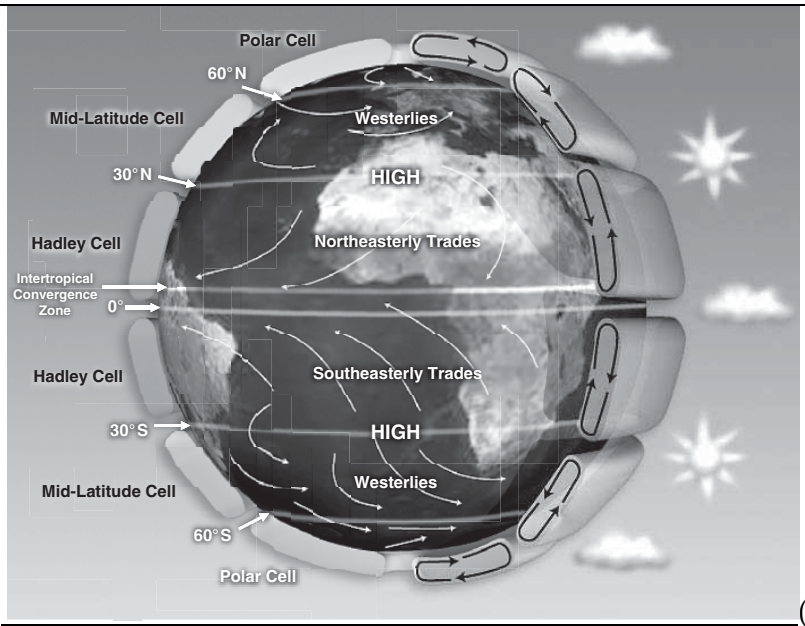
Cet appareil, précise Brewer, n'était toutefois pas le « "Brewer" moderne, comme ils l'appellent » [Brewer, 2009 (1999), pp. 20-21]. Le spectrophotomètre dit "Brewer", développé au cours des décennies suivantes, sera de taille plus importante que son aïeul, et donc moins aisément transportable, et sera automatisé. En outre, il utilisera des réseaux de diffraction, là où le "Dobson" utilisait des prismes. Brewer ne participera guère au développement de l'appareil. Le nom « Brewer » donné au spectrophotomètre relève de l'hommage au physicien britannique, plutôt que de la reconnaissance d'une paternité. On attribue au 'Meteorological Service of Canada (MSC)' la construction des premiers spectrophotomètres Brewer « modernes ». Ils seront distribués au Canada puis sur le reste du globe, pour former un réseau dès le tournant des années 1980. Faute de cadre international pour la calibration des observations UV du spectrophotomètre, les instruments du MSC demeurent aujourd'hui les sepctromètres Brewer de référence (à l'inverse, une procédure internationale WMO de calibration existe pour les 'Dobson') [http://www.data.kishou.go.jp/obs-env/cdrom/report/html_e/7_3_7.html (12/03/2012)]. Avec les spectromètres Brewer développés à partir des années 1970, on passait d'une technologie créant optiquement des bandes spectrales à une technologie enregistrant l'ensemble des spectres, puis sélectionnant le spectre à l'aide d'une grille électronique. L'autre tournant technologique résidait dans l'automatisation des spectromètres, dont les flux de données étaient recueillis par un ordinateur. Intégré dès 1982 au réseau international de mesures d'ozone, le spectrophotomètre Brewer devint un instrument incontournable, aux côtés des instruments à filtre soviétiques, et surtout des spectrophotomètres Dobson (voir Figure T dans le Chapitre 3). Ces derniers n'ont en effet pas été supplantés par l'appareil canadien ; ils continuent leur carrière d'instruments, avec un niveau d'utilisation approximativement égal aux spectrophotomètres Brewer. Le site web du Network for the Detection of Atmospheric Composition Change (NDACC), abrité par la NOAA, témoigne de l'actuelle suprématie partagée des deux instruments [*NDACC website*, 2011, http://www.ndsc.ncep.noaa.gov/organize/protocols/appendix1/ (le 10/11/2011)]. La longévité des 'Dobson' s'explique en partie par le fait que les scientifiques cherchent à obtenir de longues séries de "données" obtenues à l'aide du "même" instrument, afin d'écrire des récits sur l'ozone les plus longs possibles à partir de données vues comme homogènes, cohérentes. D'autres techniques spectrométriques, toutefois, se sont développées depuis les années 1990. Le « spectromètre hyperspectral », à bord du satellite de GOME ('Global Ozone Monitoring Experiment'), a ainsi été mis en orbite en 1995 par l'Agence Spatiale Européenne. Il est indissociable de la technique DOAS (spectroscopie d'absorption optique différentielle), développée en France par Jean-Pierre Pommereau et son équipe. [http://theses.ulb.ac.be/ETD-db/collection/available/ULBetd-03242006-115232/unrestricted/0_Couverture.pdf (le 01/04/2012)]

Les sciences montantes de la circulation générale et du climat global, peu soucieuses de l'ozone

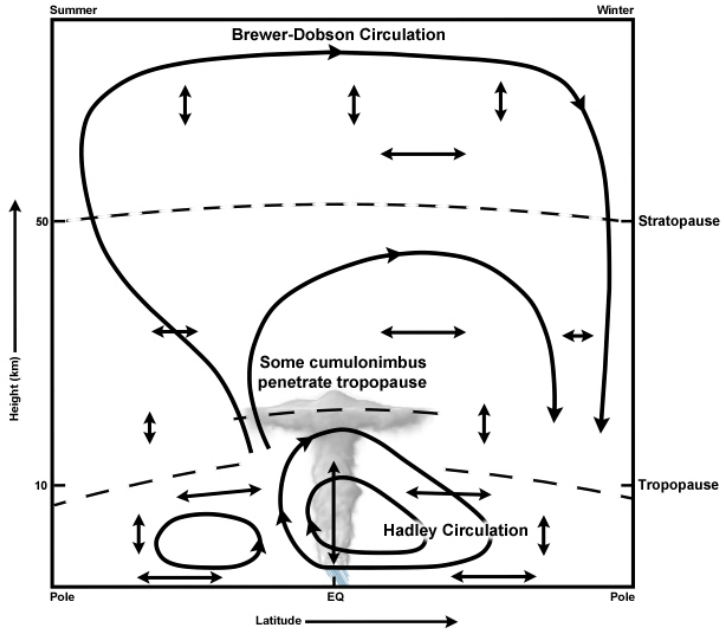
Après-guerre, la sécurisation des vols d'avions militaires et des navettes spatiales exige un programme de recherche spécifique sur le climat et la météorologie de la stratosphère. En outre, à partir des années 1940, la prévision du temps au sol passe par une prise en compte accrue de phénomènes atmosphériques à grande échelle, dans la lignée des travaux de Carl-Gustaf Rossby, A. Brewer et G. Dobson sur des phénomènes dynamiques de la moyenne atmosphère, et surtout par un travail de raffinement autour des trois grandes « cellules » atmosphériques (polaire, de moyenne latitude et de Hadley), qui affleurent voire traversent la stratosphère (voir Figure 11(b), ci-dessous). L'un des enjeux réside, là encore, dans la sécurisation des vols de nouvelles technologies aéronautiques (militaires ou civiles) et spatiales, qui traversent d'immenses territoires à grande vitesse, mais aussi dans la sécurisation du trafic marine transcontinental, la prévision des cyclones, *etc*.



(a)



(b)



(c)

Figure 11 : (a) Diagramme des trois modes dominants de "circulation générale" hémisphérique par William Ferrel en 1856 ; (b) Diagramme récent de "circulation générale" (NASA) ; (c) Représentation schématique de la circulation méridionale troposphérique et stratosphérique au solstice, combinant l'activité de la cellule de Hadley et de la circulation de Brewer-Dobson
[Edwards, 2010, pp. 38 & 39 ; http://www.goes-r.gov/users/comet/tropical/textbook_2nd_edition/print_3.htm (10/11/2013)]

Dans l'esprit des scientifiques des années 1950, comme corollaire du déploiement de multiples instruments d'analyse spectrale, la *météorologie à grande échelle* devient de plus en plus fortement corrélée aux aspects radiatifs de l'atmosphère : l'effet de serre du CO_2 et de la vapeur d'eau ; l'action filtrante de l'ozone ; la présence d'aérosols ; *etc.* La formalisation d'une *circulation atmosphérique globale* ('general / global circulation of the atmosphere', en anglais), en particulier, fait le pont entre prévision – voire modification intentionnelle – du temps à grande échelle et la thématique montante du *changement climatique global* (et la thématique afférente du cycle du carbone). Comme l'a montré Paul Edwards, la circulation atmosphérique globale suscite de premiers travaux de modélisation à partir du milieu des années 1950, de la part de Charney, Phillips, Smagorinsky, Manabe, Wexler, *etc.*, au sein d'institutions telles que le 'think tank' RAND, le laboratoire militaire de Livermore (rebaptisé LLNL ('Lawrence Livermore National Laboratory') en 1978), la 'Navy', l'Université UCLA, le 'Geophysical Fluid Dynamics Laboratory' (GFDL) de la NOAA, le NCAR, le GISS ('Goddard Institute for Space Studies') de la NASA, *etc.* (voir Figure 12, ci-dessous). Soulignons que la formalisation de la circulation globale des océans répond à la circulation globale atmosphérique, et la complète parfois, en vue d'une formalisation de la Terre comme une grande machine thermique, et comme le lieu de flux hydriques et chimiques (via les cycles biogéochimiques) permanents. De plus, des circulations générales

des atmosphères des planètes voisines sont également établies. (Nous reviendrons sur ces différents points.)

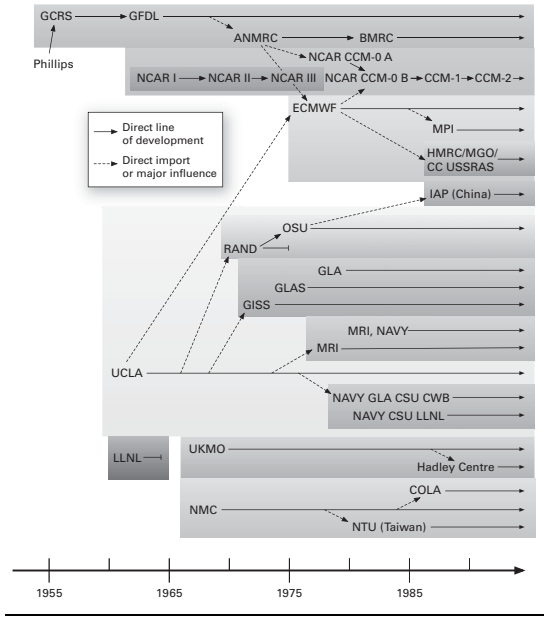


Figure 12 : Arbre généalogique des Modèles numériques de Circulation générale atmosphérique, établi par Paul Edwards
[Edwards, 2000 **in** Edwards, 2010, p. 168]

En définitive, la *stratosphère* se retrouve couplée à la *circulation atmosphérique globale* (par le biais des cellules atmosphériques globales, et surtout de la circulation de Brewer-Dobson)… circulation générale quant à elle reliée à la question d'un hypothétique *changement climatique global d'origine anthropique*, et en particulier au changement des propriétés radiatives de l'atmosphère (Quelles altérations de la dynamique à grande échelle se produiront-elles en cas de modification des propriétés radiatives atmosphériques ?). Même si, comme nous allons le montrer, la stratosphère et son ozone, dont les caractéristiques sont jugées très constantes, ne se trouvent pas au centre des préoccupations de la météorologie à grande échelle et de la science du changement climatique au cours des décennies 1940-60.

Météorologistes-modélisateurs, astronomes et océanologues : de la maîtrise du temps et du climat au programme sur le changement climatique d'origine anthropique

Dans les années 1940-50, de nombreux *physiciens-astronomes* et *physiciens-aéronomes* sont débauchés de leurs travaux traditionnels pour alimenter l'arsenal technologique et cognitif d'un l'Etat fédéral ultra-mobilisé. Ils deviennent « physiciens », « logiciens » ou « mathématiciens » dans les secteurs de la balistique et des missiles, dans la navigation, la physique optique, la météorologie, la physique nucléaire, la reconnaissance sous-marine, l'électronique… De manière générale, nombreux sont les jeunes diplômés qui font des études

atmosphériques leur vocation. La météorologie à grande échelle, en particulier, est devenue un important pôle d'attraction. Les astronomes et aéronomes retrouvent dans ce champ d'étude une nouvelle génération de *mathématiciens, physiciens et météorologistes*, dont les premiers développeurs de modèles numériques.

Au cours des deux décennies d'après-guerre, les conditions de recherche sont particulièrement favorables aux astronomes et météorologistes se trouvant sur le sol nord-américain. Pendant la Seconde Guerre mondiale, leur avenir s'est lié à des technologies belligérantes au déploiement géographique inédit (avions, V2, essais nucléaires), leur promettant d'élaborer de nouveaux savoirs sur les phénomènes atmosphériques à grande échelle. Dans le même temps, ils ont appris à utiliser la « machine de gouvernement » fédéral, et en particulier à obtenir des fonds belligérants (traçabilité des essais nucléaires, prévision du temps, expertises sur les armes météorologiques et climatiques). [Tatarewicz, 1990, pp. 6-7]

Lorsque, en 1949, l''US Air Force' décide de financer l'Observatoire astronomique de Lowell pour étudier plus avant les atmosphères planétaires, l'ambition finale affichée est d'aider à la clarification de la circulation à grande échelle de l'atmosphère *terrestre*.[101] Cet objectif implique, certes, des mesures dans l'atmosphère terrestre ; mais, les chercheurs croient par ailleurs aux vertus d'études comparatives entre planètes. En effet, les atmosphères des planètes voisines de la Terre sont vues comme des modèles "réels" d'atmosphères simplifiées, à la composition chimique simple – alors que, à l'inverse, la compréhension des grands mécanismes atmosphériques de notre planète serait parasitée par des microclimats et des météorologies locales, dus à la présence de forêts, à l'activité d'écosystèmes et des hommes, à la présence de grandes étendues d'eau, d'obstacles orographiques multiples, *etc.* (en d'autres termes, elle est liée à une composition chimique atmosphérique et à des mécanismes dynamiques plus complexes, plus multiples, multi-échelles). Aussi, *la théorisation de la dynamique à grande échelle de la Terre, qui passe par son découplage des climats, peut passer par l'étude des bilans radiatifs et des dynamiques atmosphériques de Mars, de Vénus, de Jupiter*. En retour, ces programmes d'élaboration d'une météorologie à grande échelle offrent des financements belligérants aux astronomes pour développer un champ qui leur est propre : la science des atmosphères planétaires. [Tatarewicz, 1990, pp. 6-7]

[101] Les chercheurs espèrent résoudre un double problème : distinguer la part des fluctuations de la dynamique atmosphérique causée par les phénomènes à large échelle de la partie provoquée par des phénomènes d'une nature purement locale ; distinguer la part des fluctuations atmosphériques à imputer à des mécanismes au long cours de la partie provoquée par des mécanismes se renouvelant fréquemment (les deux problématiques étant la plupart du temps liées, longue temporalité rimant souvent avec grande échelle).

En fait, le projet de l''US Air Force', lancé en 1949, avait été initié l'année précédente à l'aide de fonds débloqués par l''US Weather Bureau'. Or, si, aux yeux des astronomes, les études sur la circulation dite "générale" de l'atmosphère sont vues d'abord comme un programme de recherche juteux, elles sont en revanche prioritaires pour *l'élite des météorologistes* d'après-guerre. La plupart d'entre eux ont participé à des études de traçabilité des particules radioactives dispersées sur de très longues distances par les essais nucléaires, et sont de plus des pionniers du développement de modèles numériques sur l'atmosphère, avec lesquels ils escomptent modéliser la dynamique globale des masses d'air et les fluctuations de température atmosphérique.

Harry Wexler est une incarnation fameuse du météorologiste-modélisateur d'élite, parfaitement intégré dans le complexe militaire-industriel-universitaire états-unien de la Guerre froide. Il prend part aux recherches de météorologie à grande échelle sur les impacts des explosions nucléaires, au cours des 'Project Gabriel' (fin des années 1940) et 'Project Sunshine' (1953), financés par les militaires. En outre, C.-G. Rossby, son directeur de thèse au MIT avant la guerre, l'a initié à la pratique de la modélisation numérique et sensibilisé à la question de la hausse des concentrations de CO_2 dans l'atmosphère. Rossby avait été non seulement le père de la météorologie planétaire (*cf.* les ondes de Rossby), mais avait également collaboré aux développements des premiers modèles numériques de calcul du temps, y compris au fameux 'Numerical Weather Project' aux côtés de John von Neumann (1903-57 ; est-il besoin de présenter ce père de la cybernétique ?), dans l'immédiat après-guerre – projet qui accouchera des premières modélisations numériques du temps (sur 12 et 24 heures), en mars 1950.[102] H. Wexler reprend le flambeau, et crée en 1955, avec le même Neumann, une unité de recherche spécifique sur la circulation générale de l'atmosphère et sa modélisation, financée par le 'Weather Bureau' et les militaires (cette unité est en fait un "produit dérivé" du 'Joint Numerical Weather Prediction Unit' (JNWPU), créé

[102] Ronald Doel a insisté sur le rôle prédominant de C.-G. Rossby dans les reconfigurations majeures de la météorologie au cours des décennies belligérantes 1940-50 :

> « Né en Suède, Rossby a été formé sous la direction du fameux météorologue norvégien Vilhelm Bjerknes, avant de partir aux États-Unis en 1928 pour fonder le département de météorologie du Massachusetts Institute of Technology et de l'université de Chicago. Durant la Seconde Guerre mondiale, Rossby – devenu un des météorologues les plus influents dans le monde – a co-organisé un programme intensif pour préparer des milliers de météorologues à répondre aux besoins du temps de guerre. Comme de nombreux collègues des sciences de la terre impliqués dans les activités de guerre, Rossby a continué après 1945 à maintenir de bonnes relations entre sa profession et les responsables de l'armée sensibles à l'intérêt militaire des applications scientifiques. Bien qu'il fût plutôt à gauche sur le plan politique et qu'il se montrât sourcilleux sur le contrôle par l'État des pratiques internationales scientifiques, Rossby avait compris que la croissance de la météorologie et de la climatologie – comme des autres sciences de l'environnement physique – avait tout à gagner à être soutenue par les militaires. Comme de nombreux collègues des sciences de la terre, Rossby voyait peu d'obstacles moraux à rechercher de tels financements ou à contribuer au triomphe de l'armée américaine sur le fascisme allemand et l'impérialisme japonais. La question qui le préoccupait, lui et ses collègues, était plutôt de savoir si l'armée allait continuer à soutenir la recherche scientifique ou au contraire cesser ses financements, comme après la Première Guerre mondiale. » [Doel, 2009, pp. 143-144]

l'année précédente avec les mêmes soutiens financiers). En 1960, le groupe, initialement basé à Washington, déménagera à Princeton, et sera finalement intégré à un laboratoire nommé 'Geophysical Fluid Dynamics Laboratory' (GFDL).[103] [Hart & Victor, 1993, pp. 672-673 & 649 ; Howe, 2010, pp. 38-39]

Cet épisode atteste la capacité qu'eurent les météorologistes-modélisateurs d'élite à convaincre les militaires de la nécessité d'un programme de recherche sur la circulation générale de l'atmosphère. A l'image l''US Air Force', les militaires états-uniens sont principalement intéressés par la *prévision du temps*. Mais, ils le sont également par la *maîtrise du temps et du climat,* thématique qui connaît alors une croissance spectaculaire dans la littérature des sciences de l'atmosphère d'après-guerre, dans la littérature d'expertise commandée par le Pentagone, le 'Weather Bureau', les Conseillers du Président états-uniens, *etc…* et dans le même temps dans la littérature populaire de science-fiction. Dans les années 1945-65, la "modification volontaire du temps et du climat" – puisqu'elle est alors nommée généralement de la sorte – est un programme de recherche incontournable aux Etats-Unis et en URSS. Dans les années 1950, écrit P. Edwards, les projets militaires sur la maîtrise du temps et du climat allaient financer jusqu'à la moitié de l'ensemble de la recherche météorologique états-unienne.[104] [Fleming, 2010 ; Edwards, 2012, p. 33]

Enfin, le couplage de la circulation atmosphérique et des bilans radiatifs globaux, qui se fait notamment dans la lignée des travaux impulsés par Neumann et Wexler en 1955, ne laisse pas seulement l'espoir de modifier volontairement le climat à grande échelle en jouant sur des paramètres radiatifs de l'atmosphère (grâce à la Bombe, par exemple [Wexler, 1958]), mais amènent les modélisateurs à *tester l'hypothèse du changement climatique d'origine*

---

[103] Pour plus de détails sur les premiers développements des modèles numériques de météorologie, nous renvoyons à Edwards, 2010, "Chapter 6. Numerical Weather Prediction", pp. 111-137.

[104] Dès l'immédiat après-guerre, les expériences d'ensemencement des nuages et de diversion des tornades, promues notamment par le Prix Nobel de Chimie 1932 Irving Langmuir, suscitèrent aux Etats-Unis l'enthousiasme des militaires, scientifiques, politiciens, et même du grand public, convaincus pour la plupart de la capacité de l'Amérique à maîtriser le temps et le climat. L'un des principaux historiens de l'ingénierie atmosphérique et de la géoingénierie, James Fleming, a notamment souligné l'intérêt précoce du Pentagone et du Congrès pour le développement de telles technologies, que ce soit à des fins belligérantes ou à des fins progressistes :

> By the 1950s, the Pentagon had "convened a committee to study the development of a Cold War weather weapon. It was hoped that cloud seeding could be used surreptitiously to release the violence of the atmosphere against an enemy, tame the winds in the service of an all-weather air force, or, on a larger scale, perhaps disrupt (or improve) the agricultural economy of nations and alter the global climate for strategic purposes. Military planners generated strategic scenarios such as hindering the enemy's military campaigns by causing heavy rains or snows to fall along lines of troop movement and on vital airfields, or using controlled precipitation as a delivery system for biological and radiological agents. Tactical possibilities included dissipating cloud decks to enable visual bombing attacks on targets, opening airfields closed by low clouds or fog, and relieving aircraft icing." [Fleming, 2007(a), pp. 52-55]

Nous exposons un cas particulier de programme de recherche sur l'ingénierie atmosphérique, l'expertise sur les armes climatiques, dans notre Sous-chapitre 2.4. Nous renvoyons par ailleurs à Hamilton, 2013 et à notre article Briday, 2014 (à paraître).

anthropique à nouveaux frais.[105] Celle-ci fait même déjà quelques incursions (peu) remarquées dans les médias.[106] Dans les années 1950-60, le programme de recherche sur le changement climatique d'origine anthropique n'attire pas tant les météorologistes-modélisateurs d'élite parce qu'ils s'inquièteraient des *impacts des émissions croissantes de CO_2 sur les rendements agricoles ou la montée des mers*. Certes, en juin 1947, le Suédois Hans Ahlmann relève que « le réchauffement polaire [a] permis à la saison de navigation sur la côte occidentale du Spitzberg de passer de trois à huit mois depuis le début du XX^{ème} siècle, et que les rendements de l'agriculture soviétique [sont] nécessairement destinés à s'améliorer (Ahlmann, 1947, Committee on Geographical Exploration, commission sur les expéditions, annexe A, « Remarks made by Professor Ahlman [sic] of the University of Stockholm, Sweden », 16 juin 1947, Box 162, Folder 21, RDB). Quelques jours plus tôt, son compatriote C.-G. Rossby n'avait pas dit autre chose, prédisant que « des terres non

[105] L'hypothèse d'une contribution importante du CO_2 dans l'explication de la température moyenne de l'atmosphère terrestre a été formulée à fin du XIX^{ème} siècle (notamment dans Arrhenius, 1896). Toutefois, les teneurs en CO_2 atmosphérique estimées étaient très faibles quelle que fût l'époque géologique considérée, si bien qu'elles avaient demeuré un épiphénomène climatique pour la grande majorité des géophysiciens. Par ailleurs, la théorie des échanges naturels de chaleur dans l'atmosphère, et des échanges de chaleur entre l'atmosphère, d'une part, et les océans, la lithosphère et la biosphère, d'autre part, ne faisait l'objet d'aucun consensus. Dans son article de 1938, où il énonce un théorie du gaz à effet de serre proche de celle de nos contemporains (qui sera nommée "effet Callendar"), l'ingénieur et météorologue Guy Callendar montrera, sans convaincre ses pairs, que l'influence des émissions anthropiques de CO_2 sur les phénomènes météorologiques à grande échelle et sur la température moyenne globale de l'atmosphère était significative (*cf.* la « discussion » avec les géophysiciens, publiée à la suite de l'article de Callendar (Callendar, 1938, pp. 223 & 237-240), et Fleming, 2007(c)).

Dans les années 1950 et 1960, l'hypothèse d'une augmentation de la température globale due à l'augmentation des concentrations de CO_2 atmosphérique est prise plus au sérieux par la communauté des sciences de l'atmosphère (bien qu'elle demeure très controversée, notamment car des puits de CO_2, l'océan en tête, absorbent le CO_2 anthropique, et des aérosols réfractent les rayons du soleil). Une première raison de la prise en compte croissante du CO_2 dans les études sur le climat global tient à des mesures systématiques montrant une hausse du CO_2 dans l'atmosphère, réalisées à l'aide de techniques nouvelles. Une autre raison est fournie par les premiers modèles numériques qui, au sortir de la Seconde Guerre mondiale, estiment plausibles une évolution significative de la température moyenne du globe en fonction de l'évolution des concentrations de CO_2 (mais leurs calculs sont faits sur la base d'hypothèses thermodynamiques très simples et très contestés).

[106] Dans l'immédiat après-guerre, de premières hypothèses d'altération anthropique du climat global avaient déjà été relayées dans les médias. Comme l'a rappelé James Fleming, les hypothèses sur un changement climatique d'origine anthropique potentiellement néfaste atteignirent – mais sans fracas – le grand public au tournant des années 1950, dans un premier temps par l'intermédiaire de quotidiens et de magazines populaires américains tels que le *Saturday Evening Post*, le *Time Magazine* ou le *New York Times* :

> "Global warming was on the public agenda in the late 1940s and early 1950s, as Northern Hemisphere temperatures reaches an early-twentieth-century peak. Concerns were being expressed by scientists and in the popular press about changing climates, rising sea levels, loss of habitat, and shifting agricultural zones. Hans Ahlmann, a noted geographer reported in 1948 that Iceland had recently experienced a 1.3°C warming and its glaciers were in retreat. In 1950, a MIT meteorologist Hurd C. Willet told the Royal Meteorological Society that the global temperature trend was "significantly upward" since 1885, with most warming occurring north of the 50th parallel [, etc…]
>
> "The popular press followed the lead of the scientists. In 1950, the *Saturday Evening Post* asked, "Is the World Getting Warmer?" The article cited rising sea levels, shifts of agriculture, the retreat of glaciers, displacement of ocean fisheries, and the possible migration of millions of people displaced by climate warming. Of primary concern was the unprecedented rate of change. *Time Magazine* reported in May 1953 that industrial CO_2 emissions could increase the atmospheric concentration by about 50 percent, causing a 1.5°F warming in 100 years, or possibly more if positive cloud feedback effects occur. The article cited the authority of Gilbert Plass. Two months later, the *New York Times* Sunday magazine [cited] Callendar [to warn that] a 10 percent rise in CO_2 level [would likely cause] further warming and future problems with rising sea levels." [Fleming, 2007(c), pp. 77-79]

habitables aujourd'hui pourraient le devenir [, alors que] d'autres terres aujourd'hui habitables pourraient être transformées en désert si, effectivement, se produi[sait, comme cela semblait être le cas,] un changement dans la circulation atmosphérique. (Rossby C.-G., 1947, "Second Meeting of Committee on Geophysical Sciences", transcription des réunions du RDB, 1946-1951, 3 juin 1947, p. 41, Box 20, Entry 342, RG 330, National Archives II, College Park, MD"). [Doel, 2009, p. 144]. Mais, deux autres raisons de l'attractivité des scientifiques de l'élite états-unienne de la fin des années 1950 prévalent sur cet aspect "environnementaliste".

La première raison est d'ordre *militaire*. Comme le précise Ronald Doel : dans son discours de 1947 qui vient d'être cité, « C.-G. Rossby a attiré l'attention de ses collaborateurs militaires sur les implications stratégiques du réchauffement polaire. Il a affirmé avec force que les variations climatiques arctiques mettaient en danger les intérêts de la sécurité nationale américaine. Pour la première fois depuis le XVI^{ème} siècle, les flottes de pêche scandinaves intervenaient près du Spitzberg et, relevait Rossby, les navires soviétiques à coque d'acier parcouraient maintenant plus facilement l'océan arctique. Ces mutations avaient une portée considérable. « De telles choses ne peuvent être que le résultat d'une longue période de changement dans le climat des hautes latitudes (Rossby C.-G., 1947, *op. cit.*) », déclarait [Rossby, mais en mettent tout particulièrement] l'accent sur le lien entre les variations climatiques et leurs implications militaires, géopolitiques et stratégiques. » [Doel, 2009, p. 144]

L'autre raison est liée au désir des météorologistes-modélisateurs d'élite d'entreprendre des programmes scientifiques ambitieux. A la fin des années 1950, ces scientifiques pressentent que, dans un contexte où ils se montrent des plus coopérants avec l'armée et où les budgets publics pour la recherche atmosphérique sont très élevés, ils peuvent espérer glaner des fonds pour travailler sur des sujets de recherche plus fondamentale. Le changement climatique, en particulier, leur apparaît comme un *programme stimulant de recherche fondamentale*, qui peut leur offrir une échappatoire à la recherche sur projets que financent les militaires. Comme l'ont montré D. Hart et D. Victor, ces météorologistes-modélisateurs d'élite s'allient dans leur quête à des *océanographes*, eux aussi proches du Pentagone et du Bureau ovale. A leur tête, on retrouve le physicien océanographe Roger Revelle qui, à la fois avait été celui qui avait chaudement recommandé à la Marine états-unienne d'accroître sa capacité à lancer des armes nucléaires par-delà les mers (ce qui était devenu le programme de missiles mer-sol longue portée Polaris), et celui qui avait insisté pour que le rôle des échanges de CO_2 entre océans et atmosphère dans la compréhension du climat global soit étudié *per se*. En fait, dès les années 1950, R. Revelle trouvait plausible que les activités humaines fussent responsables du réchauffement

climatique ; et, c'est lui qui incitera le chimiste Charles David Keeling à entreprendre des séries d'enregistrement du CO_2 atmosphérique dans le cadre de l'AGI (1957-58). [Hart & Victor, 1993 ; Weart with Edwards, 2004].[107]

En 1956, l'Académie des sciences des Etats-Unis, la NAS ('US National Academy of Sciences'), crée un 'National Research Council Committee on Meteorology', qui compte parmi ses membres l'océanographe R. Revelle, le géophysicien et aéronome Lloyd Berkner, les modélisateurs-atmosphériciens C.-G. Rossby, J. Charney et J. von Neumann, et de nombreuses autres figures marquantes de la météorologie et des sciences de la Guerre froide. Début 1958, profitant de l'évènement AGI en cours, le Comité recommande au gouvernement d'augmenter son financement général à la recherche atmosphérique fondamentale. Et, il soutient la création d'un 'National Center for Atmospheric Research' (NCAR), sur le site de Boulder (Colorado). Le but, qui sera finalement atteint au cours de la décennie 1960, est d'institutionnaliser une recherche publique, civile, durable, et principalement fondamentale sur l'atmosphère, à grande échelle et échelle globale. Toutefois, signe des temps, à ses débuts en 1960, le NCAR sera financé, non seulement par la publique NSF ('National Science Foundation'), mais également par l'armée (le 'Department of Defense' et l''Office of Naval Research'). [Hart & Victor, 1993 ; Howe, 2010, pp. 47-48]

Le programme de recherche du NCAR se place à l'origine à la confluence de quatre axes de recherche atmosphérique : les études sur le bilan radiatif ; la modélisation de la circulation générale ; la recherche sur la maîtrise du temps et du climat ; et la question du changement climatique induit par le CO_2 et les aérosols. Le développement de modèles

---

[107] Les *océanographes* ont collaboré à l'élaboration de connaissances sur l'environnement physique océanique pour diverses raisons au cours de la Guerre froide. D'abord, il fallait assurer la sécurité de la navigation. Ensuite, la guerre sous-marine dépendait de la connaissance détaillée de l'environnement océanographique ; en effet, la détection et la localisation des sous-marins par ultrasons dépendaient de la température des océans, de la salinité, des courants, du relief subaquatique. Puis, jugeaient les militaires états-uniens, la connaissance de l'océanographie et de l'hydrographie de la mer arctique demeurait insuffisante. [Doel, 2009, pp. 149-150]

Mais, les océanographes ont également pris très tôt le train en marche des études sur le changement climatique, par-delà l'aspect réchauffement de l'Arctique signalé par Ahlmann en 1947 ; ceci, au travers du programme sur le *cycle global du carbone*. Ce programme, que les océanographes vont dominer jusque dans les années 1970, avait d'abord été stimulé par les études sur la traçabilité du carbone radioactif issu des essais nucléaires atmosphériques (à la fin des campagnes d'essais nucléaires atmosphériques états-uniens et soviétiques, en 1963, la concentration atmosphérique globale de carbone 14 avait doublé ! [Edwards, 2012, p. 30]) – et avait par conséquent être le lieu d'une coopération avec les atmosphériciens, pour qui les essais nucléaires atmosphériques avait également été un objet d'étude nodal. Si les études océanographiques sur le cycle du carbone sont financées principalement par l'AEC, l'Office of Naval Research (ONR)' les soutient également. Dans la lignée des travaux de Hans Suess au début des années 1950, qui a établi qu'*une partie du dioxyde de carbone* émis par les combustions fossiles – *mais pas "tout (ou presque tout)" le carbone* (comme beaucoup le pensaient alors) – était dissoute dans les océans (Suess, 1955), l'océanographe Roger Revelle du 'Scripps Institute of Oceanography' a promu efficacement un projet de recherche sur *les échanges de carbone entre océans et atmosphère*. A partir de 1957, d'abord sous financements de l'ONR et de l'AEC, Revelle et Suess collaboreront au développement de modélisations des processus chimiques et dynamiques gouvernant l'assimilation du CO_2 par les océans à l'échelle globale. De telles coopérations sur les échanges atmosphère-océan, et plus généralement sur le cycle global du carbone, se multiplieront dans les années suivantes, alors que, dans le même temps, les *météorologistes-modélisateurs* et les *scientifiques des atmosphères planétaires* se focaliseront sur l'aspect *"circulation atmosphérique"*, afin de déterminer comment celle-ci serait altérée par une hausse des concentrations de CO_2 atmosphérique (et par les autres modifications des paramètres radiatifs de l'atmosphère). [Hart & Victor, 1993, pp. 648-649]

numériques est mis au cœur du projet. A la même période, Fritz Möller et Syukuro Manabe du GFDL (Geophysical Fluid Dynamics Laboratory ; NASA) coécrivent un article sur la dynamique globale de l'atmosphère et la balance radiative de l'atmosphère, qui intègre le rôle des gaz à effet de serre CO_2 et vapeur d'eau (1961, "On the Radiative Equilibrium and Heat Balance of the Atmosphere", *Monthly Weather Review*). Ces études menées au NCAR et à la NASA font souvent écho aux travaux des scientifiques des atmosphères planétaires (notamment, sur l'effet de serre dû au CO_2, sur Mars et Vénus) ; mais surtout, elles relaient l'idée d'un changement d'équilibre radiatif de l'atmosphère terrestre depuis quelques décennies, qui pourrait être d'origine anthropique – *i.e.* l'idée d'un *changement climatique d'origine anthropique*. Pour justifier l'existence du jeune NCAR, certains de ses promoteurs invoquent déjà les dangers qu'un tel changement pourrait faire peser sur l'humanité.[108] [Hart & Victor, 1993, pp. 653-654 & 643 ; Howe, 2010, pp. 45-52]

Toutefois, comme l'ont montré Hart et Victor, même au NCAR, la recherche sur le changement climatique d'origine anthropique demeure 'pro forma' au début des années 1960, et l'expression d'une inquiétude à son sujet demeure très mesurée. De manière plus générale, jusqu'à la fin des années 1960, les études sur l'atmosphère globale ou à grande échelle seront principalement justifiées, soit par la promesse de meilleures prévisions du temps, soit par celle de contrôler le temps ou le climat. Dans les années 1950-60, les projets de "modification volontaire du temps et du climat", pensés, soit à des fins pacifiques (productivité agricole, détournement des tornades), soit à des fins belligérantes (armes météorologiques et climatiques), priment en effet largement sur les programmes d'estimation des risques liés à ce que l'on nomme alors "modification par inadvertance du temps et du climat" (dont le changement climatique). Même le NCAR ne laisse planer aucun doute sur son désir d'apporter, par son travail couplé sur le bilan radiatif et la circulation générale de l'atmosphère, une contribution à l'ingénierie atmosphérique. [Hart & Victor, 1993, pp. 653-654 ; Howe, 2010, pp. 51-52]

[108] En fait, affirment les historiens Hart et Victor, il est peu probable que les financements du NCAR eussent été moindres si cet aspect "environnemental" du programme n'avait été agité par ses membres. En effet, la recherche sur le couple circulation générale / bilan radiatif était déjà de toute façon largement justifiée par une autre finalité : la prévision et la maîtrise du temps et du climat. Par contre, le NCAR et le GFDL se trouvaient dans une position privilégiée pour appuyer leur légitimité à travailler sur le changement climatique d'origine anthropique. Au moment de leur création à la fin des années 1950, le NCAR et le GFDL comptaient parmi les rares groupes de recherche sur l'atmosphère (et l'océan) à recevoir leurs financements comme *institution*, et non dans le cadre d'un projet (militaire, s'entend). On comprend que l'un comme l'autre pouvait jouer – et entendait jouer au maximum – la carte du changement climatique anthropique, programme de recherche précieux car partiellement affranchi des *financements militaires*. (Ceci ne signifie toutefois pas que ces institutions de gouvernement s'étaient affranchies de toute dépendance aux militaires, comme en témoigne les financements du NCAR dans ces premières années.) [Hart & Victor, 1993, p. 653 ; Howe, 2010, pp. 47-48]

Enfin, ajoutons-nous pour finir, il est précisé dans le document fondateur du NCAR – le « Livre bleu » (1959), qui décrit ses objectifs, sa structure institutionnelle et son agenda de recherche –, que « puisque le lien physique entre bilan radiatif et circulation générale de l'atmosphère est tellement fort, il est probable que tout espoir de maîtriser efficacement le climat réside dans l'altération d'un aspect du bilan radiatif » [*NCAR's Blue Book*, 1959 **in** Howe, 2010, p. 52]. Comprendre : altérer n'importe quel aspect radiatif, soit par exemple en encourageant les émissions par combustion fossile pour améliorer le climat grâce à l'effet réchauffant du CO_2 (*cf.* les propositions de Nils Ekholm, Svante Arrhenius ou Walter Nerst au début du XX^{ème} siècle) ; soit, encore, en modifiant l'albédo terrestre.

Cette dernière proposition est même la forme d'ingénierie atmosphérique à grande échelle la plus commentée dans les années 1950-60. Ainsi, dans un article publié en 1958 dans *Science*, Harry Wexler examine deux possibilités de réchauffer l'atmosphère à grande échelle, à des fins civiles d'amélioration du climat ou du temps. D'abord, il décrit comment on pourrait déposer « une couche régulière, uniforme » d'environ un milliard de tonnes de carbone à l'aide « d'avions volant à basse altitude », afin de noircir des déserts tropicaux ou la glace polaire. Ensuite, il écrit que « la manière la moins chère et la plus efficace » de réduire la fuite des radiations de la surface terrestre vers l'espace, et donc de réchauffer l'atmosphère, « serait une application de l'énergie nucléaire. Imaginons l'explosion de dix bombes à hydrogène très "propres", de 10 mégatonnes chacune, disposées à une profondeur optimale dans l'océan, poursuit-il. Celle-ci engendrerait de la vapeur, qui jaillirait dans l'atmosphère, condenserait, produisant des gouttelettes d'eau, qui gèleraient ensuite » en altitude. « Le réchauffement global moyen de l'atmosphère et de la surface terrestre pourrait s'élever à 1,3°C », et « à 2,8°C s'il était concentré sur à une région comprise entre 0° et 65°N », estime Wexler… Qui conclut son article sur un nouvel appel à la recherche, dans un premier temps fondamentale, sur la dynamique atmosphérique à grande échelle et sa modélisation numérique :

> « Lorsque des propositions sérieuses de modification du temps seront avancées, comme elles ne manqueront pas de l'être inévitablement, toutes les ressources de la connaissance sur la circulation à grande échelle et la météorologie informatique devront fonctionner à plein pour prédire les résultats ('must be brought to bear in predicting the results'), afin d'éviter la situation malheureuse d'un remède pire que la maladie. » [Wexler, 1958, pp. 1059-1062 & 1063]

Nous verrons dans le dernier sous-chapitre que, dans les années suivantes, H. Wexler ajoutera à sa liste de possibilités de modification volontaire de l'atmosphère et du climat à grande échelle, la destruction de l'ozone stratosphérique. Toutefois, Wexler fait figure

d'exception. *Dans les années 1950-60, l'ozone stratosphérique est considéré certes comme un objet au grand pouvoir radiatif, mais un objet aux propriétés stables, ne contribuant pas de manière décisive aux variations météorologiques ou climatiques*. L'absence d'instruments de mesure d'ozone à bord des premiers satellites témoigne du fait que l'ozone n'est pas jugé comme un enjeu de recherche prioritaire.

Le programme satellitaire des années 1960 : des mesures radiatives sans mesure d'ozone

Toute théorisation voire maîtrise de l'atmosphère à grande échelle implique d'incorporer savamment de nouvelles équations radiatives dans les modèles de circulation générale en gestation. Pour cela, les scientifiques ont besoin de plus de données sur les sources (flux solaires, rayonnements terrestres dans l'IR, *etc.*) et les puits radiatifs (gaz à effet de serre, couche d'ozone, aérosols, *etc.*). L'Année Géophysique Internationale (AGI ; 1957-58) permet un déploiement important d'instruments de mesures au sol, et d'effectuer des campagnes de mesures aéroportées (voir Chapitre 3). Mais surtout, comme se plaisent à le souligner les auteurs du Livre bleu du NCAR, dans la foulée de l'AGI, des *satellites météorologiques* sont sur le point d'être lancés, qui pourraient accueillir des instruments de mesure atmosphérique. On ne s'étonne pas de voir les membres du 'National Research Council Committee on Meteorology' promouvoir une nouvelle 'Big Science', la météorologie satellitaire (même si les pratiques du NCAR ne sauraient être quant à elles qualifiées de 'Big Science')[109]. Ni H. Wexler, qui produira de nombreux articles et rapports sur le thème "satellite et météorologie" entre 1954 et 1962, année de sa disparition. [Howe, 2010, pp. 51-52 ; Rigby & Keehn, 1963, pp. 477-481]

[109] Le terme 'Big Science' est traditionnellement attribué à un spécialiste de la physique nucléaire, Alvin Weinberg, dans un article de *Science* intitulé "Impact of Large-Scale Science on the United States" (1961). Le physicien et historien des sciences (avec une approche scientométrique), Derek J. de Solla Price, l'a ensuite popularisé avec la parution de l'ouvrage *Little Science, Big Science* (1963). En 1967, A. Weinberg publiera à son tour un livre sur la question : *Reflections on Big Science*. Plusieurs auteurs, dont A. Weinberg et Bruce Hevly (1992, "Reflections on Big Science and Big History" **in** Galison & Hevly (eds), 1992, *Big Science: The Growth of Large-Scale Research*), ont décrit ainsi les lieux d'épanouissement de la 'Big science' de la Guerre froide : des institutions scientifiques (i) grassement financées par le gouvernement national, (ii) organisées hiérarchiquement, avec des équipes intégrées chargées de sillonner l'organigramme dans la direction verticale pour faire respecter les *objectifs* scientifiques fixés préalablement, et où régnaient (iii) le *secret* et (iv) l'allégeance au pouvoir *central* (fédéral).

Or, comme le montre Joshua Howe, ce modèle, que l'on observa à maintes reprises pendant le Guerre froide, notamment dans les milieux de la physique des hautes énergies et des particules, fut justement subverti par le NCAR. « Si, écrit Howe, un projet typique de 'big science' – le cyclotron de Berkeley, par exemple – fonctionnait un peu comme une entreprise, où le directeur général ou le conseil d'administration dictait un ensemble de priorités de recherche avec des buts spécifiques en tête et ensuite embauchait des scientifiques pour faire le travail, le NCAR opérait plutôt comme une coopérative, où des scientifiques associés, membres d'universités, avaient accès et pouvaient jouir pleinement des installations du NCAR, dont on ne pouvait trouver d'équivalent dans les universités ». Il est vrai que, si les gens du NCAR entendaient bénéficier de la mise en orbite de satellites, ils n'avaient pas la charge de leur confection, de leur lancement et/ou de leur maintenance – tout le moins dans les années 1960-80 –, à l'inverse de la NOAA ou, bien sûr, de la NASA. De plus, le NCAR se voulait précisément une émancipation de la recherche sur projets, chère aux militaires. [Howe, 2010, pp. 7 & 48-50]

En outre, ce programme satellitaire offre une nouvelle coopération entre, d'une part, les météorologistes-modélisateurs et les océanographes, et, d'autre part, les nombreux astronomes et scientifiques des atmosphères planétaires qui ont intégré la NASA (1958-…). Le premier satellite météorologique opérationnel mis en orbite par l'agence spatiale américaine sera TIROS-1, lancé le 1er avril 1960. Puis, la NASA coopérera au programme météorologique et climatique, en bonne intelligence avec la NOAA et le NCAR (voir la dernière section du Chapitre 6).

Dans les années 1960, la croissance des dépenses fédérales états-uniennes pour la recherche en sciences atmosphériques est *très importante pour la météorologie* (qui comprend donc à présent une partie satellitaire). Et, en ces premières heures des satellites et de la conquête de l'espace, elle est *spectaculaire dans les champs d'étude de l'atmosphère globale terrestre – aéronomie et changement climatique – et des atmosphères planétaires* (regroupés dans la Figure 13 ci-dessous sous le chapeau « aéronomie et atmosphères planétaires »)[110].

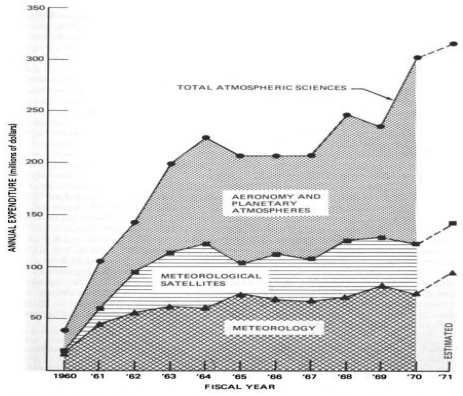


Figure 13 : Dépenses fédérales états-uniennes pour la recherche en sciences atmosphériques au cours des années 1960
[*NAS*, 1971, p. 71, "Figure 3" d'après les figures de l''Interdepartmental Committee for Atmospheric Sciences']

Or, la stratosphère s'est trouvée insérée dans la circulation atmosphérique générale, elle-même pensée comme indissociable des flux radiatifs (donc des modifications du climat global, "volontaires" ou "par inadvertance"). *Toutefois, dans les années 1950-60, la stratosphère, principalement caractérisée par son ozone, n'est toujours pas un objet nodal des sciences de l'atmosphère*, qui privilégient, pour la haute atmosphère, les phénomènes pertinents pour les télécommunications, et pour la troposphère, les effets radiatifs du CO_2, de la vapeur d'eau et des aérosols. *Le programme satellitaire en témoigne*. Dès 1965, le directeur du Laboratoire de

[110] Les dépenses totales, entre 1960 et 1969, étaient réparties comme suit : « aéronomie et atmosphères planétaires : 875 millions de dollars ; météorologie : 509 millions de dollars ; satellites météorologiques : 406 millions de dollars » [*NAS*, 1971, p. 71]

Sciences Atmosphériques du NCAR, William Kellogg, montre son intérêt pour effectuer des mesures continues d'ozone par satellite, et envisage des partenariats avec la NASA et les Laboratoires Bell pour construire les instruments nécessaires. Mais, le premier spectromètre à ozone mis en orbite, le 'Total Ozone Mapping Spectrometer' (TOMS)[111], ne sera pas lancé avant le 24 octobre 1978 (à bord de NIMBUS-7), c'est-à-dire après les alertes à la destruction anthropique de l'ozone. Dans les années 1950-60, les promoteurs d'un programme sur l'ozone – W. Kellogg, S. Chapman, ou l'influent géophysicien et spécialiste de la haute atmosphère Lloyd Berkner – devront se contenter de l'implantation terrestre de spectromètres Dobson et de mesures par avions ou ballons, principalement dans le cadre de l'AGI (dont Chapman et Berkner compteront parmi les pères fondateurs) (voir Chapitre 3). [*Will Kellogg to Walt Roberts*, 1965, "Memorandum. Possibility of a Satellite Experiment to Determine Ozone by Dave", Philip D. Thompson Papers **in** Howe, 2010, p. 82]

2.2. Une stratosphère contaminée chimiquement par les activités au sol

Les études dont nous avons fait état dans le premier Sous-chapitre – phénomènes météorologiques nés de la rencontre d'avions et de la stratosphère, liens entre ozone et météorologie stratosphérique, circulation atmosphérique, changement climatique – ont métamorphosé le rapport des scientifiques à la stratosphère. Celle-ci n'est plus étudiée comme un objet géologique sans enjeu à l'échelle des sociétés, mais comme "notre contemporaine". Les travaux que nous avons invoqués n'ont toutefois pas porté atteinte au caractère inébranlable de la stratosphère. *La mise en évidence d'une contamination chimique de la stratosphère par des émissions au sol* va s'en charger.

Dans leur ouvrage de 1942 faisant l'état des lieux des recherches académiques sur la région atmosphérique s'étirant *de la Stratosphère à l'Ionosphère*, D. Barbier et D. Chalonge ne font nulle mention de trajets de composés chimiques ou d'aérosols depuis le sol vers les régions hautes de l'atmosphère, ni de retombées dans l'autre sens.[112] Au cours des années

[111] TOMS jouera un rôle important dans l'élaboration de cartographies globales de l'ozone et dans la construction "d'images" (par modélisation numérique) du trou de la couche d'ozone. Et, sur un plan social, un rôle décisif dans l'hégémonie de la NASA en matière d'ozone, au cours de la décisive décennie 1980. Voir Chapitres 6 et 7.

[112] Si la moyenne atmosphère et la haute atmosphère partagent avec la basse atmosphère des composés chimiques (N_2, O_2, O_3, H_2O, H_2, He), *l'atmosphère des aéronomes du début des années 1940 est jugée presque hermétique à l'air troposphérique*. Comme nous l'avons vu avec les études de G. Dobson, ce n'est pas tout à fait le cas de l'ozone, formé dans la troposphère, dont une partie peut monter dans la stratosphère (même si les principaux échanges identifiés alors se font dans le sens stratosphère-troposphère). En revanche, *l'atmosphère des aéronomes du début des années 1940 est parfaitement hermétique aux émissions directes depuis le sol*. Aussi, dans leur chapitre sur la « composition chimique de la

qui suivent, les travaux d'après-guerre d'Arthur Adel et Carl Otto Lampland puis de Richard Goody montrent au contraire que des composés azotés (naturels) cheminent depuis le sol terrestre vers la stratosphère. Goody fera même l'hypothèse d'une action chimique de ces composés sur l'ozone stratosphérique (Première section). Une décennie plus tard, au tournant des années 1960, Christian Junge montrera quant à lui que des particules soufrées suivaient le même trajet du sol vers la stratosphère pour y former une couche (Seconde section).

Les composés azotés

Les travaux de Richard Goody

Pendant la Seconde guerre mondiale, Richard Goody connaît un sort identique à Alan Brewer : il se retrouve à l'école dobsonienne et devient un scientifique de l'atmosphère globale. Fraîchement diplômé d'un 'Bachelor degree in Physics' obtenu à l'Université de Cambridge, le jeune Richard Goody (Figure 14 (a)) est envoyé en 1942 au Sud de l'Angleterre, dans la plaine de Salisbury, où s'étend encore aujourd'hui l''Army Training Estate Salisbury Plain' (SPTA) britannique. C'est depuis cette base militaire située non loin de Stonehenge, au sein de l''Aircraft and Armament Experimental Establishment' d'Amesbury, que R. Goody réalise ses premiers vols à bord d'avions militaires (voir Figure 14(b)), parfois de simples prototypes. On lui a confié la mesure de caractéristiques physico-chimiques de l'atmosphère utiles à la 'Royal Air Force'. Goody assiste alors « quelque peu (*"in small ways"*) » Gordon Dobson et Alan Brewer « dans leurs mesures pionnières sur la vapeur d'eau dans la stratosphère », relatera-t-il soixante ans plus tard [Goody, 2002, p. 3].

haute atmosphère », Barbier et Chalonge se contentent-ils de distinguer la « composition au sol » de celle de la « haute atmosphère » :

- la première est dominée par l'azote, l'oxygène et l'argon, auxquels viennent s'ajouter des gaz en très faibles concentrations (CO_2, H_2, Ne, He, Xe, Kr, H_2O, O_2, et des « émanations » des éléments radioactifs), « les gaz dont la concentration varie fortement » étant la vapeur d'eau, le gaz carbonique, « l'émanation » radioactive, et l'ozone (sans que l'on puisse expliquer ses variations, si ce n'est par des hypothétiques échanges d'ozone avec la stratosphère, qui ne peuvent être quantifiés précisément ; il n'existe en effet alors aucune théorie de formation chimique de l'ozone dans la troposphère) ;
- la seconde est caractérisée, toujours en ce qui concerne les composés à l'état gazeux, par l'ozone, dont la concentration « passe par un maximum entre 20 et 30 kilomètres », et par la vapeur d'eau. Enfin, écrivent Chalonge et Barbier, d'« autres constituants de l'atmosphère susceptibles de dosages globaux » ont été identifiés : le CO_2, depuis le siècle précédent, mais aussi plus récemment « des oxydes d'azote N_2O_2 et N_2O », dont « il y aurait lieu de rechercher [s'ils] sont plus abondants en haute altitude qu'au sol ». « Cela n'aurait rien d'invraisemblable », ajoutent les auteurs dans cet ouvrage de 1942, soit une dizaine d'années avant les travaux de Goody sur ces composés. [Barbier & Chalonge, 1942, « Chapitre III », pp. 38-62]

(a)
(b)

Figure 14 : (a) Richard Goody en 2002 ; (b) le « Mosquito fighter-bomber », à la structure en bois, utilisé par Goody durant la Seconde Guerre Mondiale pour effectuer des mesures atmosphériques (température, concentration en vapeur d'eau, flux radiatifs)
[Goody, 2002, page de garde & p. 3]

Après-guerre, R. Goody continue sa carrière dans la lignée de ses travaux belligérants. Il ne se joint pas au programme de mesure d'ozone et d'étude de la dynamique convective troposphère-stratosphère de Dobson et Brewer. En lui prêtant un rapport de Pekeris (Pekeris, 1932, "The development and present status of the theory of the heat balance of the atmosphere", *MIT Meteorological Course*, 82 pages), Brewer l'a aiguillé vers une autre problématique atmosphérique : *l'équilibre radiatif de l'atmosphère globale*. Dès lors, les travaux de Goody porteront principalement sur la composition et les grands mouvements dynamiques des moyenne et haute atmosphères de la planète Terre et de ses voisines. Il s'obstinera en particulier à quantifier les gaz pouvant avoir une influence significative sur la présence de vie sur Terre ou sur le climat global.[113]

[113] Suivant une démarche qu'il qualifie de « dilettante », Richard Goody fréquente différentes communautés de scientifiques travaillant sur les atmosphères globales, « choisissant des sujets intéressants puis passant à autre chose lorsque le travail avait été accompli », déclarera-t-il. A la fin de la décennie 1950, il réalise une analyse comparée des atmosphères planétaires. Devenu une figure importante du champ, Goody se vantera d'être « l'un des rares scientifiques encore en activité à avoir étudié les atmosphères planétaires du fait de leur relation avec l'atmosphère de la Terre avant l'Age Spatial », puis à n'avoir ensuite « jamais été directement impliqué dans les larges projets qui caractérisent l'essentiel de la géophysique et de la science spatiale moderne ». Comprendre : dans les grands programmes militaires et dans la 'Big Science' satellitaire. De fait, Goody restera fidèle à l'Université de Harvard, qu'il avait rejointe en 1958 à son départ d'Angleterre, et ne rejoindra jamais la NASA. Mais, on le retrouve par exemple comme Président du Comité exécutif du Programme sur l'Habitabilité de la NASA en 1982. Dans les années 1960, Goody fréquente le giron des laboratoires et observatoires arizoniens ('Lowell Observatory', 'Kitt Peak National Observatory' et 'Kuiper's Lunar and Planetary Laboratory'), consommateurs de 'Big Technologies' qui dominent la recherche sur les atmosphères planétaires. Il y retrouve Michael McElroy (voir Chapitre 6), qu'il avait rencontré à Harvard. [Goody, 2002 ; Goody, 1998 ; *NASA*, 1982]

Lors de la remise de la 'William Bowie Medal' à Richard Goody (Boston, 1988), K.N. Liou, de l'Université de Californie, ne reconnaissait pas tant en Goody le dilettante que le professeur, et surtout le « praticien visionnaire ('a practical visionary') », qui avait introduit des techniques informatiques innovantes pour enseigner le transfert radiatif aux étudiants du MIT, avait promu la télédétection des nuages à l'échelle globale pour les études sur le climat, avait contribué à l'expertise sur le changement climatique (même si, pas plus que ses alter ergos des sciences des atmosphères planétaires, McElroy et Wofsy, il ne fut pas une figure centrale du champ). Enfin, il avait défendu l'utilisation de petits satellites, prenant part à des missions aux objectifs bien définis et à faibles coûts, plus aptes selon lui à apporter une contribution aux sciences de l'atmosphère, et en particulier du changement climatique (voir sur ce point Goody, 1999 (1996) ; Goody, 2002). [Liou, 1998]

R. Goody est aujourd'hui principalement reconnu pour ses études précoces sur les composés azotés dans la stratosphère. Au sortir de la Seconde Guerre mondiale de la guerre, qui lui a permis de découvrir cette région de l'atmosphère, Goody retourne à Cambridge, où il avait obtenu son 'BSc Physics' en 1942, pour effectuer un Doctorat. Il est financé pour poursuivre les campagnes de mesures qui doivent confirmer l'hypothèse d'aridité de la stratosphère avancée par A. Brewer. On lui demande en substance de poursuivre le projet de G. Dobson, à l'aide de spectromètres infrarouges. Goody décrit l'expérience comme rébarbative. Mais, il trouve son grain à moudre en marge de ces exercices imposés. Il profite en effet de ces campagnes de mesures d'humidité (dont il publiera les résultats dans Goody, 1949, "The thermal equilibrium at the tropopause and the temperature of the lower stratosphere") pour mesurer la distribution de l'ozone atmosphérique, ainsi que celle « d'un gaz récemment découvert » dans l'atmosphère : le protoxyde d'azote ou « oxyde nitreux », N_2O, produit de la microbiologie des sols (et dont les forts taux de production aujourd'hui sont significativement corrélés aux activités agricoles).

En collaboration avec C.D. Walshaw, Goody poursuit les travaux menés sur le N_2O par A. Adel quelques années auparavant. Comme ce dernier en 1951, Goody et Walshaw reconnaissent dans leur article de 1953 (Goody & Walshaw, 1953, "The origin of atmospheric nitrous oxide") que les principales sources d'oxyde nitreux atmosphérique se trouvent dans le sol. Mais, chose nouvelle, ils affirment par ailleurs que l'on peut retrouver des traces de ce N_2O dans la stratosphère. S'appuyant sur les distributions d'ozone et de N_2O mesurées, Goody et Walshaw formulent de plus l'hypothèse d'une (photo-)dissociation de l'ozone stratosphérique impliquant cet oxyde nitreux. [Goody, 2002, pp. 3-4 & 9 ; Goody & Walshaw, 1953]

L'hypothèse d'un impact des composés azotés sur l'ozone stratosphérique (Bates & Hays, 1967 et Crutzen, 1970)

Goody s'essaiera de nouveau à des mesures du N_2O à la fin des années 1960 (*cf.* Goody, 1969, "Time variations of atmospheric N_2O in eastern Massachusetts") [Goody, 2002, p. 8]). Mais surtout, l'article de 1953 avait stimulé un champ de recherche sur le devenir des composés azotés dans l'atmosphère. L'article avait été cité par Alder (1958), par Christian Junge (1962-63), puis dans l'article de « recension des connaissances relatives à l'oxyde nitreux atmosphérique », publié en 1967 dans *Planetary and Space Science* par les géophysiciens de la 'Queen's University' de Belfast, D.R. Bates et P.B. Hays (Bates & Hays, 1967).

D. Bates et P. Hays reprennent à leur compte l'hypothèse de Goody et Walshaw, qui proposent que l'on peut retrouver des traces de ce N_2O dans la stratosphère ; mais,

contrairement à eux, ils jugent que la production d'oxyde nitreux d'origine atmosphérique n'est *pas nécessairement* un facteur « négligeable » sur le plan de la chimie de la stratosphère, contrairement à ce que pensaient leurs prédécesseurs. L'article de Bates et Hays marque ainsi *le début d'une chimie de l'ozone stratosphérique intégrant les composés azotés et, par là même, intégrant des composés chimiques provenus du sol*. [Bates & Hays, 1967, p. 193]

Dans son article de 1970 sur l'action des oxydes d'azote (NO et NO_2) sur l'ozone atmosphérique, qui comptera de manière décisive dans la décision de lui attribuer le Prix Nobel de Chimie en 1995 « pour son travail en chimie atmosphérique, en particulier sur la formation et la décomposition de l'ozone » (partagé avec Mario Molina et Sherwood Rowland)[114], Paul Crutzen repartira des travaux de Bates et Hays. En 1967, écrit Crutzen, ces derniers avaient seulement indiqué que « le N_2O, possiblement produit par une activité microbiologiques dans les sols et ensuite diffusé à travers la troposphère, pouvait être converti en partie en azote radicalaire (NO et NO_2) par un processus de photodissociation dans la stratosphère ». Lui, entend montrer que, d'après ses propres données et ses travaux théoriques, l'hypothèse de Bates et Hays, si elle se vérifie, implique que « les concentrations de NO et NO_2 ont un effet direct dans le contrôle des distributions d'ozone dans une partie importante de la stratosphère, et par conséquent sur les taux de production d'ozone atmosphérique. » Dans cette étude intitulée "The influence of nitrogen oxides on the atmospheric ozone content", Paul Crutzen reconsidère l'ensemble des réactions connues impliquant les composés azotés, pouvant possiblement se produire dans la stratosphère. [Crutzen, 1970]

La démarche est théorique. Elle s'inscrit dans un programme de réévaluation du cycle de Chapman. Il vise à mettre en adéquation la théorie de l'ozone avec les nouvelles données d'ozone, notamment celles obtenues lors de et dans la lignée de l'AGI – alors que, entre 1930 et 1960, aucune publication scientifique n'avait cherché à modifier l'embryonnaire chimie de l'ozone stratosphérique de Chapman.[115] D'une part, les constantes des réactions chimiques du cycle de Chapman sont réévaluées (en particulier, celles relatives à la "quatrième" équation : $2O_3 = 3O_2$). D'autre part, de nouvelles réactions chimiques sont proposées pour "compléter" le cycle. Cette attitude a perduré jusqu'à nos jours. Comme l'écrit l'épistémologue Maureen Christie, en règle générale, les scientifiques préfèrent décrire la

[114] http://www.nobelprize.org/nobel_prizes/chemistry/laureates/1995/crutzen-facts.html (20/08/2013)
[115] Une exception, peut-être : David Bates et Marcel Nicolet avaient mis en exergue dès 1950 la dissociation, par les radiations solaires, de la vapeur d'eau en atomes d'hydrogène et radicaux hydroxyles, à très haute altitude (90km environ). Ce travail n'apportait aucune certitude sur l'action des composés hydrogénés sur la couche d'ozone, et se focalisait presque exclusivement sur la très haute atmosphère [Bates & Nicolet, 1950]. D'autres études suivront qui, par contre, s'y essaieront (*cf.* Roney, 1965, " On the influence of water vapour on the distribution of stratospheric ozone" ; voir « Figure D » dans le corps du texte, cadre « 1950, 1965 »).

théorie de Chapman comme « correcte mais incomplète » [Crutzen, 1970, p. 320 ; Christie, 2000, pp. 13-16]. Pour le dire autrement,

LA CHIMIE ATMOSPHERIQUE EST UNE SCIENCE PRINCIPALEMENT "CUMULATIVE",

qui a tendance à toujours monter en complexité

(… en corollaire à quoi, elle doit régulièrement trouver des moyens de redescendre en complexité pour ne générer des calculs trop complexes – dans les simulations numériques, notamment).

Après des décennies d'accumulation d'équations chimiques, on retrouve ainsi le cycle de Chapman, l'impulsion de ce programme de formalisation, présenté (dans une notation récente, schématique et synthétique) sous sa date de première publication (« 1930 »), au sein d'un schéma général de la chimie de l'ozone stratosphérique, proposé par Paul Crutzen en 1992 (Figure 15, ci-dessous) :

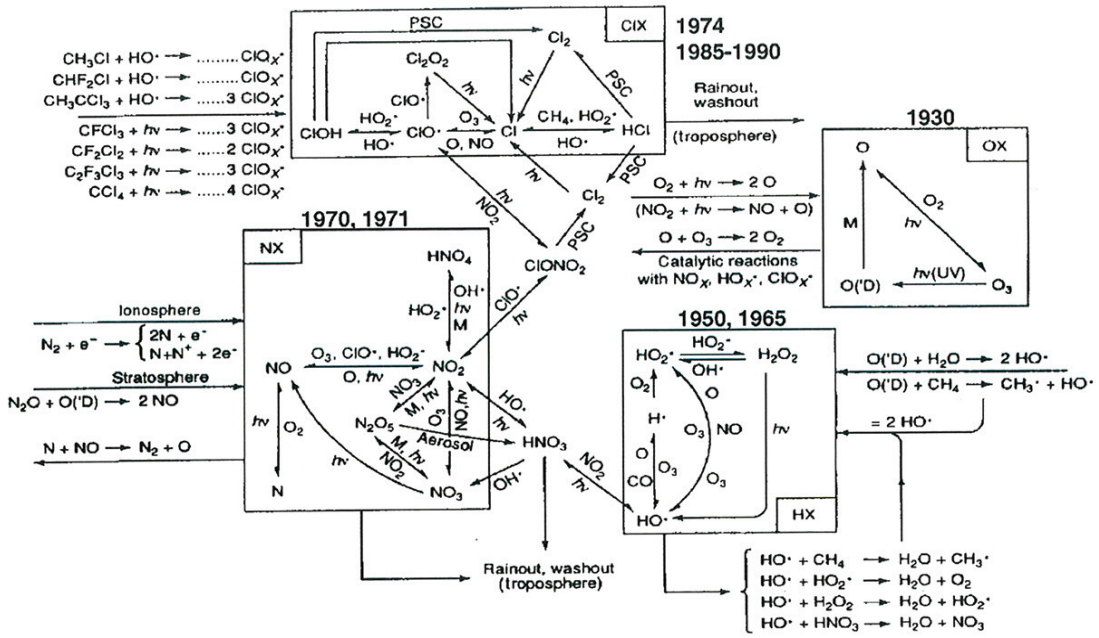


Figure 15 : Un schème théorique complexe des interactions chimiques dans la stratosphère [Crutzen & Golitsyn, 1992]

La nouveauté de Crutzen, 1970, jugée décisive par la communauté scientifique, réside dans l'assertion selon laquelle *des composés azotés provenant du sol pourraient avoir un impact significatif sur les taux d'ozone stratosphérique*.[116] Certes, en apportant des "preuves empiriques" et en formalisant plus avant le schème réactif entre ozone et composés azotés de Bates

[116] A l'inverse, les composés azotés ne sont amenés à jouer un rôle majeur dans la chimie de l'ozone ni pour Goody, ni pour Bates et Hays. Leurs travaux sur les composés azotés ont été entrepris parce que ces composés peuvent servir de traceurs atmosphériques, donc d'indices des masses d'air (en particulier celles, convectives, qui montent vers la stratosphère). Outre leur intérêt pour la science météorologique "fondamentale", ces masses d'air constituent des freins ou des moteurs à la "technologisation" de la moyenne atmosphère en cours. C'est pourquoi les 'Air Force Cambridge Research Laboratories' états-uniens financent en partie les travaux de Bates et Hays, du laboratoire de la 'School of Physics and Applied Mathematics' de la 'Queen's University' de Belfast ('via' l'"European Office of Aerospace Research') – nouvel exemple, soulignons-nous, de l'emprise tentaculaire des Etats-Unis sur le monde de la recherche scientifique de l'époque. [Goody, 1969 ; Bates & Hays, 1967]

et Hays, Crutzen fait évoluer le schème théorique des aéronomes Chapman et Nicolet, *au-delà des seuls composés (ou « radicaux ») oxygénés (O_2 et O) et hydrogénés (HO et HO_2)*.[117] Mais surtout, Crutzen formule dans son article l'hypothèse d'un *potentiel effet significatif sur les concentrations d'ozone stratosphérique*, jusqu'alors considérées comme indépendantes des émissions chimiques au sol.

Dès 1971, les résultats de Crutzen seront exploités par Harold Johnston, qui travaillait jusqu'alors sur le rôle des composés azotés dans la chimie de la troposphère, pour tirer la sonnette d'alarme au sujet du danger que pourrait constituer la construction d'une flotte d'avions civils supersoniques pour la couche d'ozone stratosphérique. Puis, en 1974, dans leur démonstration sur la possible influence des composés chlorés (dont les CFC) sur les taux d'ozone stratosphérique, Rowland et Molina utiliseront une analogie avec l'action des composés azotés défendue par Crutzen, 1970 [Johnston, 1971, p. 518; Molina & Rowland, 1974, p. 810] (voir Chapitre 4). Toutefois, dans son article de 1970, Crutzen ne cherche nullement à montrer que la couche d'ozone serait menacée. Les composés azotés nouvellement inclus dans le « schème réactionnel », le NO et le NO_2, sont « d'origine naturelle » (N_2O), et prennent toujours place au sein d'une théorie de l'ozone stratosphérique où les concentrations d'ozone demeurent constantes d'une année sur l'autre. [Crutzen, 1970]

La couche d'aérosols soufrés de Junge

Au début des années 1950, Richard Goody avait envisagé l'existence d'un pont azoté entre le sol et la stratosphère. A la fin de la décennie, le chimiste allemand Christian Junge (voir Figure 16(a)), une figure centrale de la physico-chimie des aérosols,[118] établit quant à lui

[117] En fait, en 1970, c'est-à-dire au moment de la publication de Crutzen, qui précède de quelques mois la première alerte à la destruction anthropique de l'ozone, la théorie chimique de l'ozone inclut déjà des composées autres que les composés oxygénés, hydrogénés et azotés (voir Crutzen, 1970 & 1971, et la Figure D ci-dessus, tirée de Crutzen & Golitsyn, 1992).

[118] C. Junge vint à l'étude de l'aspect *chimique* des aérosols dans le cadre d'une recherche « sur le grossissement des particules d'Aitken » dans l'atmosphère (*cf.* Junge C., 1952, » Das Größenwachstum der Aitkenkerne «, *Ber. Deut. Wetterdienst US-Zone*, 38, pp. 264-267). Initié en Allemagne, ce travail est poursuivit aux Etats-Unis à partir de 1953 (Junge C., 1954, "The chemical composition of atmospheric aerosols", I. Measurements at Round Hill Field Station, June-July 1953. *J. Meteorol.*, 11, pp. 323-333) [Jaenicke, 1996, p. 6]. Après-guerre, trois sujets de recherche mobilisent C. Junge : la distribution en tailles des aérosols, la chimie des aérosols et la couche d'aérosols stratosphériques. Dans la corps du texte, nous nous focalisons sur le dernier aspect.

Quant à la chimie des aérosols, elle désigne "la composition chimique" des aérosols. Celle-ci est étudiée pour plusieurs raisons. D'abord, la connaissance de la composition chimique d'un aérosol permet de déterminer son indice de réfraction, et ainsi d'estimer son rôle radiatif et son impact sur le climat global. Ensuite, la dangerosité sanitaire d'un aérosol inhalé dépend de sa composition chimique. Enfin et surtout, étudier la composition chimique des aérosols atmosphériques permet de cibler les sources à l'origine de ces aérosols, ainsi que les processus d'évolution chimique subis au cours de son séjour dans l'atmosphère. De plus, les aérosols sont susceptibles d'être intégrés dans la phase nuageuse, et par conséquent de modifier la composition chimique des pluies, dont leur acidité. Malgré leur rôle de puits atmosphériques, les aérosols ne sont pas des objets centraux de la théorie chimique de l'atmosphère avant les années 1980 voire 1990. Nous verrons toutefois dans notre dernier chapitre que les modules de chimie atmosphérique des modèles du changement climatique d'aujourd'hui tentent depuis quelques années de prendre en compte différents aspects chimiques des aérosols.

l'existence d'une couche d'aérosols soufrés dans la stratosphère, qui résulte de leur transfert depuis la troposphère.

Dans les années 1950-60, les aérosols atmosphériques intéressent les chercheurs à trois égards. D'abord, leur impact radiatif est reconnu comme important, à travers les études sur les émissions volcaniques, notamment [Dörries, 2006].[119] Ensuite, la composition des aérosols est caractéristique d'une région (par exemple, les aérosols désertiques). De plus, s'ils sont "imprégnés" de marqueurs chimiques (les particules solides adsorbent des éléments chimiques gazeux), ils constituent des traceurs atmosphériques de premier choix, aux côtés des particules radioactives. Enfin, les aérosols représentent un danger pour les engins aéronautiques ou aérospatiaux.

Après des travaux de météorologie dans l'armée allemande durant la guerre, Junge émigre aux Etats-Unis au milieu des années 1950, tant les perspectives de recherche dans une Allemagne en reconstruction sont maigres.[120] Il travaille pour l''Air Force Cambridge Research Center' dans le Massachussetts (il y demeurera jusqu'à son retour en Allemagne en 1962), où il est chargé de mener une étude sur les micrométéorites présentes dans la stratosphère. Qu'elles soient d'origine cosmique, volcanique, ou issues des tests de bombes atomiques, elles constituent une menace probable pour les satellites et leurs véhicules-porteurs qui transitent vers la haute atmosphère. Outre la cartographie atmosphérique de la répartition des micrométéorites que lui a confiée l''US Air Force', C. Junge attribue un autre enjeu à son étude. Sur la base de mesures réalisées au crépuscule, des travaux récents ont en effet conclu qu'existerait une distribution verticale particulière de certains aérosols, qui seraient disposés en couches (*Cf.* Penndorf (1954) pour la seule troposphère, et Bigg (1956) pour la troposphère et la stratosphère). Les ressources abondantes que Junge reçoit de l''Air Force Cambridge Research Center' lui permettent de mener les deux études de front. Junge lance des ballons depuis Sioux Falls, dans le Dakota du Sud, depuis Hyderabad en Inde, ainsi que des sondes à impacts secrètement transportées sur des avions de reconnaissances U2. [Jaenicke, 1998, p. 5][121]

---

[119] Rappelons à ce propos que, au début des années 1970, il n'existe toujours pas de consensus sur une tendance globale au réchauffement (imputé principalement aux gaz à effet de serre), ou au refroidissement (imputé principalement aux aérosols, aérosols soufrés principalement).

[120] Chimiste de formation, Christian Junge (1912-1996) se lance dans la météorologie en 1930 par passion pour l'aviation, dont la pratique nécessitait des connaissances météorologiques. En 1935, il soutient une thèse sur les noyaux de condensation atmosphériques. Au cours de la Seconde Guerre Mondiale, Junge est mobilisé dans la *Luftwaffe*. Il lance des tracts de propagande à l'aide de ballons météorologiques depuis l'est de la France, puis travaille à la prédiction du temps sur les territoires où se déroulent les combats, en France, en Afrique du Nord, en Crête et en Italie. [Jaenicke, 1996, p. 2]

[121] Ruprecht Jaenicke écrit :

> "Additionally impactor probes were secretly carried on U2 reconnaissance planes, at that time unknown to the public. […] By secretly, we mean that all U2 flights were government secrets. Even though Junge had

Les résultats dépassent les attentes. Au terme de quatre ans de recherche, l'existence d'une couche d'aérosols soufrés stratosphériques est établie.[122] De plus, C. Junge et ses collègues affirment avoir établi qu'elle résultait d'émissions de soufre gazeux depuis le sol (des émissions « naturelles », principalement du sulfure de carbonyle (OCS) issu de processus biogéniques et d'éruptions volcaniques). Le soufre gazeux serait ensuite adsorbé sur des particules solides, qui transiteraient jusqu'à la stratosphère, pour former une couche entre 16 et 23 kilomètres environ (*cf.* Junge & Manson, 1961 ; voir Figure 16 (b) ci-dessous).[123] [Jaenicke, 1998, pp. 3-5]

(a)

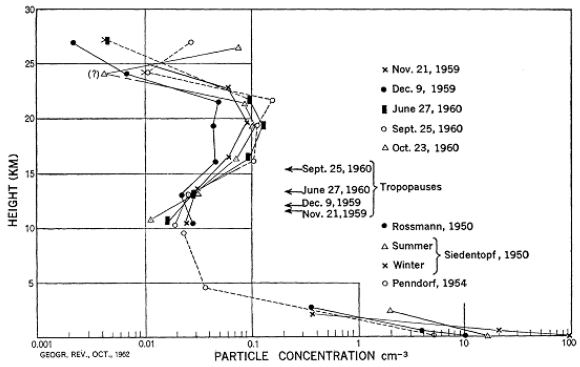


FIG. 3—Vertical distribution of aerosols of radius 0.1 to 1.0 micron, after Chagnon and Junge (see text footnote 6 for reference). The curves above 10 km were all obtained over the Middle West of the United States, those at lower levels over Central Europe. Note the well-marked aerosol layer between 16 and 23 km, believed to be of worldwide occurrence.

(b)

Figure 16 : (a) Photographie de Christian Junge vers 1970 ; (b) représentation graphique de cinq profiles stratosphériques d'aérosols de grande taille identifiés par l'équipe de Junge [Jaenicke, 1998 ; Junge, Chagnon & Manson, 1961, « Stratospheric Aerosols » **in** Hare, 1962, p. 532]

---

become a US citizen, he was not told of the flights because he was from Germany. He was only told that the measurements were made at a specific height, geographical location, and exposure time." [Jaenicke, 1996, p. 5]

Nous soulignons que le récit du chimiste des aérosols R. Jaenicke, dont sont tirées ces phrases, est hélas l'unique source bibliographique que nous possédions sur les travaux de Junge aux Etats-Unis entre 1953 et 1962. L'auteur, un étudiant de C. Junge après le retour de ce dernier en Allemagne, tient probablement de la bouche de Junge la plupart des évènements qu'il utilise pour construire son récit biographique sur son ancien professeur (Jaenicke, 1996).

[122] Le météorologue-chimiste et ses collègues communiqueront leur "découverte" d'une couche de soufre stratosphérique, dans deux articles publiés en 1961 (Junge, C.E., Chagnon C.W. and Manson J.E., 1961, « Stratospheric aérosols », *J. Meteorol.* 18, pp. 81-108 ; Junge C.E. & Manson J.E., 1961, « Stratospheric aerosol studies », *J. Geophys. Res.* 66, pp. 2163- 2182.)

[123] « La persistance d'aérosols dans la stratosphère pendant des périodes non volcaniques a fait l'objet d'observations au crépuscule au début du XX^{ème} siècle », rapporte Jean-Pierre Vernier dans sa thèse de doctorat en sciences de l'atmosphère. Cependant, il a fallu attendre les années 1950 et l'utilisation d'impacteurs en ballon pour confirmer leur présence. Les « premières observations de Junge *et al.*, 1961 » ont révélé une quantité relativement importante de grosses particules ($r \geq 0.15$ m) vers 20 km, dont la composition chimique a été déterminée en étudiant leur température de vaporisation. Elle correspondait à « un mélange de 75% d'acide sulfurique (H_2SO_4) et 25% de vapeur d'eau (Rosen et al., 1964) ». Ces particules étaient donc assez grosses pour diffuser la lumière solaire, et pour que leur effet soit observé depuis le sol (d'où elles ont été pour la première fois identifiées). La couche de soufre stratosphérique, qui fut par la suite prise en compte dans les travaux sur la couche d'ozone et sur le climat, est aujourd'hui plus volontiers désignée sous le nom « couche d'aérosols stratosphériques », ou *« couche de Junge »*, en hommage à son "découvreur". A présent, on juge que ces particules hydrophiles et sulfatées seraient émises essentiellement par les océans ; et le SO_2 gazeux pourrait avoir, soit une origine naturelle (éruptions volcaniques), soit une origine anthropique (combustion de produits fossiles). Junge, Chagnon et Manson (1961), puis Friend (1966) et Richard Cadle et ses collègues (1962 & 1968), qui prolongèrent leurs travaux, se contentaient d'affirmer que le dioxyde de soufre était émis depuis le sol puis subissait une importante convection (une source identifiée fut le volcan Gunung Agung de Bali, rentré en éruption en 1963), avant de former « des gouttes d'acide sulfurique diluée », « par oxydation et hydratation dans la stratosphère ». [Vernier, 2010, p. 21 ; Cadle *et al.*, 1973, p. 745]

Tout comme R. Goody l'avait fait au sujet du N_2O, C. Junge trace un chemin sol-stratosphère pour des particules chimiques. Peu après, Richard Cadle, faisant à son tour de cette couche d'aérosols stratosphériques son objet d'étude, dessinera le chemin du retour, en démontrant que des particules de soufre descendaient de la stratosphère vers le sol. En définitive, chimie stratosphérique et chimie du sol se trouvent désormais reliées, dans les deux sens, par des trajets d'aérosols soufrés (*Cf.* Cadle *et al.*, 1968).[124] Par ailleurs, le cycle du soufre est à présent couplé à la stratosphère... Tout ceci à une échelle *a priori* globale, puisque cette couche d'aérosols, tout comme la couche d'ozone avant elle, est jugée globale *a priori*. Ainsi, Kenneth Hare avait indiqué, en bas du croquis de Junge, qu'il pensait que cette couche d'aérosols bien délimitée observée dans le 'Middle West' des Etats-Unis pourrait être observée « sous toutes les latitudes ('believed to be of worldwide occurrence') » (en fait, elle sera jugée plus tard comme une couche à forte amplitude géographique, mais ne recouvrant pas la totalité du globe, et importante seulement après d'importantes éruptions volcaniques). [Hare, 1962, p. 532 ; voir Figure 16 (b) ci-dessus]

L'US Air Force, qui finance R. Junge et son équipe, est moins enthousiasmé par leurs résultats que ne le sont leurs pairs. Alors que Junge publie sa "découverte", le programme connaît une fin rapide et imprévue, rapportera Jaenicke (qui se fait sans doute le relai du récit que lui a fait Junge). Cette couche d'aérosols soufrés qui avaient attiré Junge ne semblaient pas représenter un risque pour les technologies aéronautiques et aérospatiales. Par conséquent, les travaux de Junge n'avaient plus guère d'intérêt aux yeux de l'US Air Force. [Jaenicke, 1998, p. 5]

Après 1962, date de la fin du contrat de Junge à l''Air Force Cambridge Research Center', la recherche de Junge n'aura plus de lien avec la haute atmosphère, ni l'espace (puisque, rappelons-le, le programme de départ portait sur les micrométéorites spatiales). Il retournera en Allemagne, où il contribuera à bâtir le premier réseau de mesures chimiques des précipitations à l'échelle européenne, initié au milieu des années 1950 par des chercheurs suédois, avec à leur tête Erik Eriksson (voir Sous-chapitre 3.2). Junge travaillera également à la rédaction d'un article sur les aérosols radioactifs, de nouveau avec Charles Chagnon, sur

[124] L'Etats-Unien Richard Cadle (1914-2010) fait partie des premières grandes figures de la physico-chimie de l'atmosphère à grande échelle, et de la théorie des cycles biogéochimiques globaux. Comme nombre de ses semblables dans les années 1960, il combinera études de l'atmosphère de la Terre et études des atmosphères des planètes voisines. On lui doit des publications précoces sur « la chimie des atmosphères contaminées », sur « les réactions chimiques atmosphériques de l'atome d'oxygène », sur « la photochimie de l'atmosphère supérieure de Jupiter », ainsi que sur « les particules des panaches volcaniques » et « les particules de l'atmosphère de l'Antarctique ». C'est dans ce dernier article, daté de 1968, que Cadle et ses collègues affirment que des échantillons d'air prélevés à proximité du sol ont révélé la présence d'aérosols soufrés, auxquels ils attribuent une origine stratosphérique. (Cadle *et al.*, 1968).

la base de leurs mesures effectuées aux Etats-Unis sous financement de l''US Air Force Air Weather Service', au cours de l'année 1961. [Junge, 1963 ; Mézaros, 1981, p. 154 ; Chagnon & Junge, 1965, p. 332]

Jusqu'à sa retraite prise en 1980, Christian Junge restera reconnu par ses pairs comme le chercheur de référence en sciences de l'aérosol. En 1968, il sera promu directeur du 'Max-Planck-Institute für Chemie', où il créera un Département de Chimie Atmosphérique (Paul Crutzen lui succédera à la tête du Département en 1980). Aux yeux du physicien et chimiste de l'atmosphère Ruprecht Jaenicke,[125] qui lui consacra plusieurs articles *in memoriam* (dont celui de 1998, dans lequel nous avons puisé (Jaenicke, 1998)), C. Junge serait en outre celui qui aurait « nommé et créé la chimie atmosphérique ('named and created the complete science of atmospheric chemistry') à travers son travail et son ouvrage *Atmospheric Chemistry and Radioactivity* publié en 1963 ». Mais, si Junge y définit la chimie atmosphérique (qu'il nomme « chimie de l'air ») comme « la branche de la science atmosphérique s'intéressant aux constituants et aux processus chimiques de l'atmosphère sous la mésocime,[126] c'est-à-dire en dessous de 50 km environ », il consacre en fait l'essentiel de ses pages à décrire *la composition moyenne de l'atmosphère* en substances non chimiquement réactives et la *dynamique* de l'atmosphère, et non les réactions chimiques qui s'opèrent en son sein. L'ouvrage se présente plus comme un état de l'art sur la composition chimique moyenne de l'atmosphère et les phénomènes dynamiques à grande échelle, que sur la réactivité chimique de l'atmosphère (notre acception de la chimie atmosphérique).[127] Par contre, *Atmospheric Chemistry and*

---

[125] Ruprecht Jaenicke s'est lui aussi spécialisé dans l'étude des aérosols. Il a présidé entre 1995 et 1998 la "Gesellschaft für Aerosolforschung (GAeF)" créée en 1972, qui coédite le *Journal of Aerosol Science* (1980-…). Ce 'forum for international cooperation and exchange for all aspects of aerosol science' avait été dirigé vingt ans auparavant par Junge (1977-1978).

Dans son article biographique de 1998, Jaenicke, tout en rendant hommage à Junge, souligne l'effet pervers de l'hégémonie de ses travaux sur le champ des études sur les aérosols, au cours des décennies 1960-80 :

> "The European Aerosol Association created the Junge Award in honor of Christian Junge. The Junge award is intended to recognize outstanding research contributions of an individual who shaped a completely new field of aerosol science and/or technology, as Junge did for atmospheric chemistry. The first recipient in 2000 was Sheldon Friedlander. In 2002 his birthplace the city of Elmshorn in Northern Germany named a new street after Christian Junge. Thus, his name will also be remembered by the public. However, any monument also casts a shadow. As for Junge, he offered such a convincing picture of the atmospheric aerosol that researchers of the time became almost blind to other explanations and possibilities or overlooked effects. They simply copied his ideas. As an example, we might suggest biological aerosol. It had no place in Junge's "chemical model" of atmospheric aerosol. It is only today (Jaenicke, 2005) that a few researchers are realizing the important role biological particles may play in forming ice nuclei and cloud condensation nuclei. Pratt et al (2009) suggested that 50% of ice crystal residues are of biological material." [Jaenicke, 1998, p. 7]

[126] « Mésocime ('Mesopeak') » est un terme suranné, qui désignait le sommet de la couche d'inversion de température entre stratosphère et mésosphère, situé aux alentours de 50-55 km d'altitude.

[127] Lorsque Junge en vient, dans un dernier chapitre, à aborder « le rôle de la pollution de l'air dans la chimie de l'air » (Chapitre 6), il précise qu'il s'agit de « la pollution de l'air dans la mesure où elle est d'importance générale, et non locale, pour la chimie de l'air » ; et, qu'il souhaite par ailleurs mettre l'accent sur « les phénomènes à grande échelle ». La synthèse des études sur les atmosphères polluées qu'effectue Junge consiste par exemple à comparer des aérosols d'origine anthropique à des aérosols d'origine naturelle, et à conclure qu'aucune zone non polluée par l'homme n'existe en l'Europe de l'Ouest, en Europe centrale et dans le nord-est des Etats-Unis (les travaux d'Eriksson sont de loin les plus abondamment cités – après les travaux de l'auteur, s'entend). Junge passe rapidement sur les « deux

Radioactivity est l'un des premiers ouvrages à s'attarder sur « les cycles des constituants atmosphériques » à l'échelle globale : cycle de la vapeur d'eau, du dioxyde de carbone, du soufre, de l'azote – programme dans lequel R. Cadle est lui aussi très actif. Mais, il s'agit là d'une contribution à la compréhension des échanges chimiques entre "sphères", et non à la chimie intrinsèque à l'atmosphère. [Jaenicke, 1998 ; Junge, 1963]

2.3. Des évènements atmosphériques massifs et subits pouvant potentiellement affecter l'ozone

Les transports chimiques identifiés par R. Goody et C. Junge sont porteurs de menaces à l'immuabilité et au caractère immaculé de la stratosphère. Dans le même temps, des études questionnent la faculté d'"évènements brusques et massifs" tels que les volcans et les essais nucléaires d'altérer rapidement et violemment la stratosphère, dont ses concentrations en ozone.

Les éruptions volcaniques

Jusqu'à l'alerte au trou de la couche d'ozone au-dessus de l'Antarctique en 1985, l'ozone des pôles ne constitue pas un enjeu de mesures supérieur aux mesures d'ozone au-dessus des zones tempérées, des tropiques ou de l'équateur. Néanmoins, l'Antarctique est déjà pour Dobson un lieu de mesures privilégié, qui sera équipé en priorité au cours de l'AGI. La raison de cet attrait des aéronomes pour l'Antarctique est à imputer à la "propreté" de sa troposphère, inhérente à son éloignement des sources de pollutions, anthropiques et naturelles.[128] Puisque la troposphère de l'Antarctique est peu polluée, l'observation de la

types de pollution fondamentales », le smog soufré de type londonien et le smog photochimique de type californien. Or, ces pollutions sont des pollutions dites « secondaires », qui résultent de *réactions chimiques au sein de l'atmosphère* (« la conversion de SO2 en H2SO4 ou SO4= sur des particules de fumée » pour le smog soufré, et « la formation d'ozone et d'autres oxydants par réactions photochimiques entre constituants gazeux tels que les oxydes d'azote et divers hydrocarbones » pour le smog photochimique). Les travaux sur ces pollutions troposphériques complexes des villes, stimulés au sortir de la Seconde Guerre mondiale dans de nombreux pays industrialisés, ont accouché dans les années 1950 d'un champ d'élaboration théorique sur les réactions chimiques troposphériques, sous l'impulsion de Haagen-Smit notamment (que Junge, 1963 ne cite pas !) ; elle est, au début des années 1960, *le champ de chimie atmosphérique – au sens où nous l'entendons – le plus remuant*.

Par ailleurs, Junge *élude l'autre chimie de l'atmosphère, celle, globale, de l'ozone stratosphérique*, ainsi que les considérations sur le filtrage radiatif opéré par la couche d'ozone, pour se focaliser sur « la distribution de l'ozone dans l'atmosphère, en particulier dans la troposphère ». [Junge, 1963, pp. vii-xii, 4, 29, 37, 65, 81, 69 & 353-372]

[128] Les régions polaires sont vues comme des laboratoires au service de la physico-chimie de la stratosphère "naturelle". En 1956 et 1957, Dobson remarque, d'après les premières mesures prises à la Station de Halley Bay en Antarctique britannique, que les niveaux d'ozone sont plus bas qu'attendus en septembre et octobre, avant de retourner à la normale en novembre ; en conséquence, la théorie de l'ozone devait être différente pour l'Antarctique et pour les latitudes plus élevées.

Signalons dès à présent que ce sont les mesures au long cours faites à Halley Bay à l'aide d'un spectrophotomètre Dobson qui serviront à construire les premiers récits scientifiques de la formation du trou de la

stratosphère y est potentiellement plus facile. De plus, puisque la stratosphère située au-dessus du continent antarctique peut être pensée comme un système très isolé des autres régions atmosphériques, les caractéristiques intrinsèques à cet objet couche d'ozone peuvent, en première approximation, y être sondées.

Comme G. Dobson, Richard Cadle et ses collègues vont utiliser le laboratoire Antarctique. Alors qu'ils poursuivent la tradition de recherche sur la couche d'aérosols soufrés stratosphériques d'origine troposphérique (la couche de Junge), ils se postent en Antarctique, région qui a la vertu d'être éloignée des sources industrielles de soufre (y compris, plus éloignée que ne l'est la région polaire boréale). Ils tirent profit de l'éruption du volcan Gunung Agung de Bali en 1963, qu'ils comparent à de précédentes éruptions. Entre 1956 et 1968, Richard Cadle cosigne plusieurs travaux sur le trajet des particules volcaniques. Grâce à leurs relevés d'aérosols volcaniques en Antarctique, Cadle et son équipe concluent que les éruptions volcaniques peuvent *renforcer la couche de soufre stratosphérique* (ou couche de Junge).[129] De plus, ils établissent l'existence de masses d'air aptes à transporter des panaches volcaniques d'une extrémité à l'autre d'un l'hémisphère (voire même, de Hawaï à l'Antarctique), via la stratosphère.[130] [Cadle *et al.*, 1968]

---

couche d'ozone antarctique, à commencer par celui de la célèbre publication de l'équipe britannique de Joe Farman en 1985. [Farman & Hamilton, 1975, *Measurements of atmospheric ozone at the Argentine Islands and Halley Bay, 1957-72* ; Farman, 1985].

Sur l'utilisation scientifique de l'Antarctique, ou sur le rôle politique de l'Antarctique comme lieu de collaboration entre pays et comme laboratoire des réglementations environnementales internationales à l'heure de la Guerre Froide, nous renvoyons aux travaux de Sebastian Grevsmuehl, dont Grevsmuehl, 2012.

[129] Cadle et ses collègues écriront : « Le phénomène de couchers de soleil dans les poussières volcaniques ('The phenomenon of volcanic dust sunsets') est produit par une augmentation très marquée de la « couche de sulfate » vers 20 km [… O]n peut s'attendre à ce que les concentrations relatives et absolues de sulfate dans l'air arctique et antarctique augmentent fortement pendant et après [ces] éruptions qui produisent des couchers de soleil spectaculaires, mondiaux ('eruptions that produce spectacular, world-wide sunsets'). » Toutefois, selon eux, ces éruptions n'affectaient pas la couche d'ozone - « à des températures stratosphériques, l'ozone ne réagit pas avec le dioxyde de soufre, alors que l'oxygène atomique, oui. » [Cadle *et al.*, 1968, p. 103]

Au cours des décennies suivantes, des liens entre aérosols soufrés stratosphériques (de la couche de Junge) et destruction couche d'ozone seront par contre établis, également lors d'évènements volcaniques, comme en témoigne le septième et plus récent *Scientific Assessment of Ozone Depletion* :

> "Volcanic eruptions can inject large amounts of sulfur directly into the stratosphere. This can considerably enhance the stratospheric aerosol layer (or Junge layer) for several years. Such an effect was observed after the eruptions of El Chichón in 1982 and Mt. Pinatubo in 1991. […] The enhanced stratospheric aerosol loading [by volcanic eruptions] can lead to very significant ozone depletion on a global scale, as was both observed and modeled after these eruptions. The ozone depletion is mostly due to heterogeneous reactions on sulfuric acid aerosol particles that convert halogen reservoir species into more re-active forms. The overall chemical changes include an increase in halogen radicals at the expense of nitrogen radicals. Thus, the net effect on ozone depends primarily on the stratospheric halogen loading, changing for instance from ozone decreases when chlorine loading is high to small ozone increases when chlorine loading is low." [*WMO*…, 2011, pp. 3.12-3.13]

L'explication donnée fait appel à la théorie des réactions hétérogènes (dans les nuages polaires stratosphériques), qui est postérieure aux années 1960 (elle sera développée principalement pour expliquer les mesures du trou de la couche d'ozone, à partir de 1985 (voir Chapitre 6).

[130] Ne possédant pas les moyens techniques d'observer le déplacement du panache de particules à l'aide de l'imagerie satellitaire, ni même d'appareils de télédétection, Cadle s'en remit à la collecte de particules solides, dont il compara la composition physico-chimique avec les sédiments trouvés sur les flancs des volcans. Il conclut que « la similarité

Les travaux dirigés par R. Cadle mettent en outre à mal l'idée de "pureté" de l'atmosphère de l'Antarctique, et surtout contredisent de nouveau l'idée de "pureté" de la stratosphère. Une conséquence potentielle de l'arrivée massive et subite d'émissions volcaniques est une altération chimique de la stratosphère. Pourtant, jusqu'en 1970, les éruptions volcaniques ne joueront pas un rôle important dans la genèse d'une chimie de la stratosphère, mais plutôt dans l'élaboration d'une science du climat global.[131]

Après l'alerte à la destruction anthropique de l'ozone, en revanche, le suivi des émissions de panaches de fumées des grandes éruptions volcaniques fournira des études de cas de choix pour les chimistes de l'atmosphère, notamment en 1982 (El Chichón, Mexique) et en 1991 (Pinatubo, Philippines). Quant au Mont Erebus (sur le flan du continent Antarctique), en activité depuis trente-cinq ans, il sera "le volcan de la discorde" lors de la controverse scientifique la plus médiatique sur le trou de la couche d'ozone, déclenchée par Maduro et Schauerhammer en 1992 [Christie, 2000, pp. 191-192 ; voir Chapitre 7].[132]

Les essais nucléaires

Aux yeux d'un scientifique de l'atmosphère, une explosion radioactive importante (Hiroshima et Nagasaki, des essais nucléaires atmosphériques, des accidents de centrales nucléaires à Tchernobyl ou Fukushima) partage quelques caractéristiques avec une grande éruption volcanique. Outre leur impact radiatif, volcans et explosions nucléaires émettent des polluants en quantité importante, facilement identifiables (soit dans l'atmosphère, soit lors de leur retombée au sol), et dont une partie atteint la stratosphère. Si le chimiste et

---

entre les tracés de micrographes à électron obtenus à partir d'échantillons collectés en Antarctique et ceux collectés dans le cratère Halemaunau du volcan Kilauea [à Hawaï] est frappante » [Cadle *et al.*, 1968, p. 103].

131 Au XX^{ème} siècle, les travaux sur les émissions volcaniques ont d'abord porté sur leur impact radiatif, et ont donc principalement servi les sciences du climat. Dans son article "In the public eye: Volcanology and climate change studies in the 20th century", l'historien des sciences Matthias Dörries parle même d'un champ de recherche en "volcanism and climate change (VCC)". Ce champ de recherche, remarque M. Dörries, la "nature" l'aurait "désavantagé" pendant 51 ans, entre l'éruption du Katmai (Alaska, 1912) et celle de l'Agung (Indonésie, 1963), laps de temps au cours duquel, « faute de nouvelles données », le débat [sur les liens, à l'échelle "géologique" (*cf.* toujours le débat sur les âges glaciaires), entre volcans et climat] stagna », avant qu'il ne redevienne important. Dès les années 1940-50, toutefois, Harry Wexler avait insisté sur l'influence potentielle des volcans sur le climat global, afin d'expliquer les changements climatiques observés à son époque : l'absence d'éruptions volcaniques depuis le début du siècle ne pouvait-elle pas expliquer la hausse des températures de surface, dans les hautes latitudes ? (Par ailleurs, Wexler utilisait les éruptions (en particulier, celle du Krakatoa en 1883), comme des modèles analogiques de l'impact climatique des Bombes H (rappelons que Wexler participa notamment au célèbre *Project Sunshine : Woldwide effects of atomic weapons* (US Atomic Energy Commission and US Air Force Project RAND, R-251-AEC (amended), 6 Aug. 1953))) [Dörries, 2006, pp. 88 & 100-104]

132 Ces grandes éruptions volcaniques du dernier tiers du XX^{ème} siècle fourniront en outre des études de cas sur l'impact radiatif des aérosols, dans le cadre d'une expertise sur l'ozone stratosphérique qui ferait une place de plus en plus importante aux interactions avec le climat. Enfin, c'est par une analogie faite avec ces éruptions, que Paul Crutzen proposera en 2006 de réfléchir à la possibilité d'injecter des aérosols soufrés dans la stratosphère en cas de réchauffement climatique trop élevé dans les décennies à venir ; en retour, cette proposition lançait un programme de recherche de chimie atmosphérique sur les impacts d'une telle géoingénierie sur la couche d'ozone (voir Chapitre 8). [Crutzen, 2006 ; *WMO*/…, 2011, pp. 3.12-3.15]

météorologue Christian Junge suivit de près les programmes de recherche sur les particules radioactives et y collabora, au point de baptiser son ouvrage de référence *Air Chemistry and Radioactivity* (Junge, 1963), c'est parce que les particules radioactives, telles que celles émises lors des essais nucléaires atmosphériques réalisés par les grandes puissances militaires après-guerre, constituent des traceurs atmosphériques de premier choix [Jaenicke, 1998]. Les nombreux tests nucléaires atmosphériques menés entre 1945 et 1962 par les États-Unis et l'Union Soviétique (qui signent, avec le Royaume-Uni, le Traité d'interdiction partielle des essais nucléaires en 1963) puis par la France et la Chine (le dernier essai nucléaire atmosphérique officiel a été effectué par la Chine en 1980) ont, de fait, été une aubaine pour les océanographes (voir note de bas de page n°107), les météorologistes et les aéronomes.

Ils ont, pour commencer, contribué de manière décisive à dessiner la dynamique troposphérique-stratosphérique à grande échelle. L'une des figures centrales des études pré-1970 sur les échanges au niveau de la tropopause a été l'astro-géophysicien de formation, devenu météorologiste, l'Etats-Unien Edwin F. Danielsen. Les études relatives aux retombées nucléaires ont été, pour lui aussi, décisives. Danielsen a travaillé au NCAR et au 'Ames Research Lab' de la NASA.

Ensuite, les essais nucléaires atmosphériques ont contribué à construire les cycles globaux du carbone et de l'azote. En effet, les essais nucléaires à l'air libre émettent dans l'atmosphère des particules en grande quantité. Parmi elles, des particules contenant du carbone 14, qui sont expulsées dans la troposphère, et même jusque dans la stratosphère. Il est plutôt facile de tracer de tels isotopes radioactifs ; par conséquent, ils permettent de donner des indices sur les flux de masses d'air dans la troposphère et la stratosphère. De plus, lors des essais nucléaires atmosphériques, de grandes quantités d'oxydes d'azote se retrouvent également injectées dans la stratosphère. [Edwards, 2012, pp. 29-32 ; voir également Edwards, 2010, "Nuclear Weapons Tests and Global Circulation Tracers", pp. 207-215]

Enfin, un autre aspect nous intéresse ici. Dans les années 1960, aux Etats-Unis, l'un des organes chargés d'évaluer l'impact atmosphérique des essais nucléaires est l''Atomic Energy Commission' (AEC). Une « énigme intéressante » est alors soulevée, relate l'historien Erik Conway. Des scientifiques de l'AEC discutent l'hypothèse d'après laquelle les tests nucléaires seraient en capacité de réduire de manière « légère mais mesurable » la concentration en ozone stratosphérique, du fait de leur action sur les flux radiatifs et la météorologie de la stratosphère. [Conway, 2008, p. 130]

Le climat n'est certes pas propice à une quelconque alerte : les Etats-Unis et l'URSS ont cessé leurs essais nucléaires atmosphériques (en 1962) ; et, dans les années 1960, les données

obtenues par le réseau de spectromètres Dobson suggèrent que les concentrations moyennes d'ozone sont globalement plutôt sur la pente ascendante…[133] Mais, précisément, cette légère augmentation des taux d'ozone mesurés, non prévue par les théoriciens, intrigue les scientifiques. Elle indique que *la stratosphère est plus complexe que ne l'avait jusqu'alors envisagé la communauté scientifique*. En outre, l'attitude des scientifiques, qui consiste à envisager à présent l'éventualité d'une destruction de l'ozone stratosphérique, indique que, *au milieu des années 1960, l'équilibre chimique de l'ozone stratosphérique ne va plus de soi*.[134] [Edwards, 2012 ; Conway, 2008, p. 130]

2.4. Harry Wexler : « nous pouvons détruire la couche d'ozone »

L'historien James Fleming a montré que, dès 1962, Harry Wexler (1911-62) avait imaginé une théorie au sujet d'une possible destruction chimique involontaire de la couche d'ozone par l'homme. La genèse de la théorie de ce météorologiste-modélisateur s'inscrit au cœur des mutations des études sur la stratosphère et l'environnement global que nous avons décrites

[133] Une légère augmentation des concentrations en ozone a été mesurée par les Dobson pendant dix ans environ, avant de s'arrêter en 1968. Les concentrations sont ensuite restées stables pendant plusieurs années.

[134] Une nouvelle controverse sur les effets des armes atomiques éclatera au milieu des années 1970 avec l'hypothèse de *l'Hiver nucléaire*. Si ses théoriciens mettront surtout en avant les risques *climatiques* d'une guerre nucléaire, ils estimeront que la *couche d'ozone* pouvait elle aussi être affectée significativement, avec des conséquences climatiques et sanitaires. Soit, du fait de l'impact radiatif des essais nucléaires, soit par l'action chimique des oxydes d'azote générés suite aux explosions (*Cf.* Foley Henry M. & Ruderman Malvin A., 1973, "Stratospheric NO Production from Past Nuclear Explosions," *J. Geoph. Res.*). L'une des premières publications marquantes sera signée par R.C. Whitten, W. J. Borucki et R.P. Turco (1975, "Possible Ozone Depletions following Nuclear Explosions," *Nature*). Dès 1975, l'Académie des Sciences états-unienne publiera un rapport sur les effets d'une guerre nucléaire. Ses experts feront usage de l'analogie avec les effets des poussières volcaniques, pour confirmer qu'un danger de destruction d'ozone existait, tout le moins dans le cas d'explosions nucléaires de plus d'une mégatonne. Ils ne mettront toutefois pas en garde contre elle, ni par ailleurs contre de possibles conséquences climatiques cataclysmiques, et souligneront avec insistance les incertitudes et insuffisances de la recherche sur le sujet (National Research Council, 1975, *Long-Term Worldwide Effects of Multiple Nuclear-Weapons Detonations*). [Dörries, 2011, pp. 212, 217 & 207-8]

Dans ce travail, nous avons décidé de ne pas accorder une place importante à l'épisode de tension autour de la théorie de l'Hiver nucléaire, dans la mesure où cette question n'anima guère les débats dans les communautés de l'ozone, de la chimie troposphérique ou des cycles biogéochimiques. Nous soulignons toutefois que l'affaire de l'Hiver nucléaire, qui fut médiatisée de manière significative aux Etats-Unis et en Europe au début des années 1980, est à prendre en compte pour expliquer, à la fois :

- les attaques à la crédibilité des scientifiques théorisant des changements rapides de l'atmosphère planétaire, en particulier des théoriciens du changement climatique (cette théorie de l'hiver nucléaire, et donc d'une modification rapide et intense du climat global, est-elle sérieuse ?, questionneront des scientifiques comme Edward Teller, le « Père de la Bombe H » et partisan indéfectible du programme d'armement nucléaire aux États-Unis, qui « encouragera la recherche au LLNL ('Lawrence Livermore National Laboratory') pour invalider, ou tout le moins atténuer les résultats des théoriciens de l'hiver nucléaire » au début des années 1980, écrit Matthias Dörries [Dörries, 2011, p. 219]. Erik Conway et Naomi Oreskes ont quant à eux montré que le physicien-astronome Robert Jastrow a contesté dans la foulée la théorie de l'hiver nucléaire et les résultats et prévisions sur le changement climatique des Bert Bolin/James Hansen/GIEC/*etc.* dès le tournant des années 1990 [Oreskes & Conway, 2010, pp. 47-54, 59 & 186-190] ;
- et la construction de mobilisations internationales contre l'armement nucléaire *et* le changement climatique d'origine anthropique, dans la première moitié des années 1980. (Voir Dörries, 2011)

dans les Sous-chapitres précédents : l'intérêt croissant de météorologistes pour la stratosphère, en vue d'élaborer des savoirs météorologiques (et climatiques) à grande échelle ; la croyance dans le potentiel de l'homme à modifier rapidement l'atmosphère, y compris ses caractéristiques à grande échelle, dont, peut-être, la couche d'ozone. En outre, le contexte de proposition de cette théorie est tout à fait symptomatique de l'univers dans lequel baigne l'élite scientifique du complexe science universitaire-militaire-industrie états-unien, puisque Wexler la propose en marge de ses travaux d'expertise sur le développement hypothétique d'armes climatiques par les armées américaine et soviétique. [Fleming, 2007(b)]

Informer sur les risques de développement d'armes climatiques

La gigantesque éruption du Mont Pinatubo aux Philippines en 1991 fut qualifiée d'« expérimentation naturelle » par les scientifiques. Il fut établi qu'elle avait modifié sensiblement le climat global, et que, *du fait de la présence élevée de chlores libérés par les CFC*, elle avait fait diminuer les concentrations d'ozone stratosphérique (les aérosols soufrés volcaniques affectent la dynamique de la stratosphère et sa température, et sont le lieu de réactions chimiques hétérogènes). Outre ces *expériences "réelles"* et "naturelles" offertes par les volcans, ou les expériences "réelles" et "artificielles" produites par les essais nucléaires, les scientifiques de l'atmosphère font régulièrement appel à des *expériences "fictives"*, appelées parfois *expériences de pensée* – dont la théorie de l'Hiver nucléaire, qui occasionnera des débats animés au sein de la communauté scientifique à la fin des années 1970 et au début des années 1980. [Dörries, 2006, p. 87 ; *WMO/…*, 2011, p. 2.46 ; Dörries, 2011]

Dans les années 1950-60, l'altération involontaire du climat est nommée, nous l'avons dit, « modification du climat par inadvertance ("inadvertent climate modification") ». L'altération, tout aussi involontaire, mais plus locale et moins durable, de la météorologie par les pollutions urbaines est désignée par les termes « modification du temps par inadvertance ("inadvertent weather modification") ». Le pendant à cette double tradition est la double tradition de « modification intentionnelle du temps et du climat ("intentional weather and climate modification") ».[135] Au cours des vingt-cinq années qui suivent la fin de la Seconde guerre mondiale, la mobilisation des chercheurs états-uniens et soviétiques pour modifier le temps et le climat de manière intentionnelle est à peu près du même ordre de grandeur que pour estimer leurs altérations par inadvertance, ou leurs variations naturelles… même s'il est difficile d'estimer la part consacrée à l'un ou l'autre de ces trois

[135] Ces désignations perdureront quelque peu dans les années 1970 (Exemple : Hidy *et al.*, 1971, "Inadvertent weather modification and Los Angeles smog"). Mais, dans le contexte de "tournant environnementaliste", un irrémédiable glissement sémantique s'opérera, transformant les « modifications du temps et du climat par inadvertance » en « impacts des pollutions », la « modification intentionnelle du temps et du climat » en « ingénierie atmosphérique et climatique », et la « modification intentionnelle du climat global » en « géoingénierie ». [Kwa, 2001]

objectifs, dans la mesure où les trois thématiques sont le plus souvent abordées conjointement dans les travaux scientifiques (en effet, modifier le temps et le climat implique d'en comprendre la part naturelle et la part anthropique involontaire). De nombreux projets locaux ou régionaux sont lancés, en vue de stimuler la productivité agricole, détourner les tempêtes, ou modifier le temps à des fins belliqueuses. Des projets à grande échelle sont également proposés, à des fins progressistes ou belligérantes, même si aucune expérience *in situ* à grande échelle n'a semble-t-il jamais été réalisée. [Fleming, 2010]

Une part importante des travaux d'ingénierie atmosphérique a été effectuée par l'armée, et donc, vraisemblablement, de manière secrète. Mais, par ailleurs, des scientifiques tels qu'Irving Langmuir ont promu publiquement le programme de modification du temps. A la fin des années 1950, l'idée de manipuler le climat à grande échelle a infiltré la presse grand public états-unienne, et a déjà fait l'objet de romans de Science-fiction.[136] Mieux, dans un contexte d'exacerbation de l'hybris technologique et de course à l'armement, de nombreux hommes politiques, dont les plus hautes instances politiques états-uniennes et soviétiques, encouragent les travaux sur la modification intentionnelle du climat. H. Wexler, qui s'est fendu en 1958 d'un article, certes pondéré mais plein d'espoir, sur les possibilités de modifier le temps et le climat à grande échelle à des fins civiles (Wexler, 1958), communique dans les années suivantes sur les armes climatiques. Au cours d'un discours intitulé "On the Possibilities of Climate Control", prononcé en 1962 devant ses pairs météorologues à trois

[136] J. Fleming cite un article de *Time* de 1954, dans lequel est exposé la proposition de Herman Oberth de mettre en orbite d'immenses miroirs d'un diamètre d'un 'mile' environ (soit 1,6 km environ), afin de concentrer l'énergie du soleil à volonté. La proposition date de l'époque pré-satellitaire (Oberth l'avait formulée dès 1923, puis elle avait été relayée dans une note classée de l'"U.S. Army Air Force' de juillet 1945, avant d'apparaître dans *Time* l'année suivante). Les mois qui suivirent le lancement de Spoutnik en 1957, période pendant laquelle H. Wexler discute la possibilité de modifier le temps et le climat à grande échelle, sont caractérisés par un déferlement d'articles et de déclarations publiques sur la possibilité de contrôler le temps et le climat depuis l'espace. Parmi ces déclarations, celle, éminemment lyrique et célèbre du Sénateur Lyndon B. Johnson, qui déclare que les maîtres de l'espace – « les maîtres de l'infini » – seront aussi les maîtres « du monde » :

> "Control of space means control of the world, far more certainly, far more totally than any control that has ever or could ever be achieved by weapons, or by troops of occupation. From space, the masters of infinity would have the power to control the earth's weather, to cause drought and flood, to change the tides and raise the levels of the sea, to divert the Gulf Stream and change temperate climates to frigid […] If, out in space, there is the ultimate position—from which total control of the earth may be exercised – then our national goal and the goal of all free men must be to win and hold that position. (Johnson, 1958, "Text of Johnson's Statement on Status of Nation's Defenses and Race for Space", *New York Times*, January 8, 1958, 10)"

Par ailleurs, la littérature de Science-fiction, qui s'est déjà projetée dans la Terraformation (*Cf. Last and First Men* d'Olaf Stapleton (1930), ou encore *Farmer in the Sky* de Robert Heinlein's (1950)), s'intéresse à présent aux armes climatiques. Dès le début des années 1950, raconte J. Fleming, Herbert George Wells en personne fait le tour des laboratoires de 'General Electrics', où officient Vincent Schaefer et Irving Langmuir, deux figures centrales de la modification du temps après-guerre. Il est escorté par le journaliste Kurt Vonnegut, alors au Département des relations publiques de 'General Electrics'. En 1963, K. Vonnegut publiera un roman de science-fiction sous le titre de *Cat's Cradle*, dont le personnage principal, un certain Felix Hoenikker, est inspiré des personnalités d'I. Langmuir et d'Edward Teller. [Fleming, 2010, pp. 207-210 & 231 ; Fleming, 2007(a), pp. 52-54]

reprises (à Boston, à Hartford et à Los Angeles)[137], le très réputé et influent météorologiste états-unien met en garde contre la capacité technologique de modifier de manière abrupte le climat qu'ont, selon lui, atteint les deux grandes puissances.[138] [Fleming, 2010 ; Howe, 2010, pp. 41-45]

Wexler reprend, pour commencer, sa démonstration sur la capacité de l'homme à augmenter rapidement la température moyenne de l'atmosphère globale à l'aide de bombes H disposées dans l'océan (augmentation de 1,7°C, propose-t-il en 1962 ; quatre ans plus tôt, il avait estimé la hausse de température globale moyenne par cette technique à 1,3°C ; voir Sous-chapitre 2.1). Ensuite, Wexler relaie la proposition de mise en orbite d'un anneau de particules de poussières (d'abord faite par des Russes pour réchauffer l'Arctique, précise-t-il). Enfin, le météorologiste-modélisateur présente plusieurs scénarios de destruction chimique de l'ozone stratosphérique, par l'injection de plusieurs centaines de milliers de tonnes d'agents chlorés ou bromés à l'aide d'avions stratosphériques. Cette altération de la couche d'ozone vise à augmenter rapidement la température de la Terre. [Fleming, 2007(a), pp. 56-57; Fleming, 2007(b), "note n° viii" p. 9 & p. 5 ; Wexler, 1958]

Dans son discours de 1962, Wexler déclare que, depuis la fin de la guerre, « il est devenu respectable » d'aborder le sujet de la maîtrise du temps et du climat. L'optimisme technologique qui amine certains acteurs de cette première phase de la Guerre froide est peut-être naïf. L'historien J. Fleming n'hésitera pas à se moquer de ces géoingénieurs et faiseurs de pluies qui verront, l'un après l'autre, leurs rêves brisés contre un miroir aux alouettes [Fleming, 2007(a), p. 57 ; Fleming, 2010]. En tout cas, au tournant des années 1960,

---

[137] Wexler Harry, 1962, "On the Possibilities of Climate Control," Boston Chapter of the American Meteorological Society, Jan 9, 1962; Traveler's Research Corporation, Hartford, CT, Jan. 11, 1962; and UCLA Department of Meteorology, [as Regent's Lecturer in Meteorology] Feb. 28, 1962. Notes in Manuscript Division, Library of Congress, Wexler Papers, Box 18, Speeches and Lectures, 1962. [Fleming, 2010, p. 308]

[138] Harry Wexler est diplômé d'Harvard et du MIT, et signataire de 127 articles, préfaces ou lettres dans les journaux scientifiques, entre 1933 et 1962. Son décès suscita des hommages dans le *Bulletin of the American Meteorological Society, l'Indian Journal of Meteorology and Geophysics, le WMO Bulletin, Nature, le COSPAR [Committee on Space Research] Information Bulletin, le Journal of Glaciology* [*cf.* Rigby & Keehn, 1963, « bibliography of the publications of Harry Wexler »]. Voici une liste d'influences, d'héritages et de reconnaissance que l'historien de la météorologie James Fleming associe à Wexler :

> "Harry Wexler (1911-1962) was one of the most influential meteorologists of the mid-twentieth century. He was a graduate of Harvard and MIT, a student of C.G. Rossby, a proponent of air mass and frontal analysis**,** and Chief of the Scientific Services Division of the U.S. Weather Bureau during an era that saw the introduction of regular radiosonde ascents, weather radar, atmospheric atomic testing and global fallout tracing**,** scientific sounding rockets, and both NWP [Numerical Weather Prediction] and GCMs [General Circulation Models]. [On the same picture, you may find] Wexler with Von Neumann, Charney, and others associated with the Institute for Advanced Study meteorology program at Princeton. Wexler was a pioneer in satellite meteorology**.** He was in charge of the TIROS program and helped Verner Suomi fly his first heat budget experiment on Explorer 7. Wexler was head of US Antarctic programs for the International Geophysical Year, established the Mauna Loa Observatory and supported Dave Keeling's measurements of CO_2, wrote on peaceful use of satellites and weather control for JFK**,** and planned the World Weather Watch which became a reality in 1963, the year after his sudden death at the age of 51. Wexler was clearly on top of his science, a leader in new techniques and technologies, and a respected international figure." [Fleming, 2007(b), pp. 2-3]

la maîtrise du temps et du climat est sur toutes les lèvres. Pour Wexler, la mise en garde contre son utilisation belligérante n'est pas seulement un levier à actionner pour obtenir des financements de la part d'un gouvernement en pleine crise de paranoïa, elle prend place au sein d'une double stratégie pacificatrice. D'abord, les allocutions de Wexler s'intègrent au sein de la stratégie – éminemment ambiguë ![139] – de la dissuasion militaire. Ensuite, Wexler entend fédérer les scientifiques des deux Blocs autour des usages pacifistes de la modification intentionnelle du temps et du climat – projet, soulignons-nous, tout aussi ambivalent, puisque les technologies civiles et belligérantes sont presque identiques (en d'autres termes, il s'agit de technologies dites "duales"), et sont souvent discutées par les mêmes acteurs (Wexler en est un exemple patent).[140]

D'après l'historien des sciences et biographe de H. Wexler, J. Fleming, Wexler serait même la source du discours du Président des Etats-Unis J.F. Kennedy devant l'ONU, à New York, en septembre 1961, au cours duquel il avait promu une collaboration mondiale sur la météorologie satellitaire… et « des efforts de coopération entre toutes les nations dans les domaines de la prévision du temps et, en définitive, sa maîtrise ("cooperative efforts between all nations in weather prediction and eventually in weather control") ».[141] La proposition s'adresse bien sûr avant tout à l'URSS. Wexler et Kennedy cherchent à créer un climat de confiance entre les élites des deux blocs, autour de projets – le développement de

---

[139] Les alertes de Wexler se présentent en fait comme doublement ambigües. D'une part, elles participent d'une stratégie de dissuasion militaire à double tranchant (pour le *statu quo* de la paix / pour la course à l'armement). D'autre part, un lanceur d'alerte comme Wexler est dans le même temps impliqué dans les spéculations sur les technologies civiles de modification volontaire de l'environnement à moyenne et grande échelle. Or, ces technologies sont semblables aux armes climatiques (il s'agit de technologies dites "duales").

[140] Soulignons, en outre, que le programme d'amélioration de la nature est souvent présenté comme un programme « paramilitaire », avec le vocable qui va avec, comme en témoigne par exemple ces mots de l'ingénieur russe naturalisé américain en 1924, Vladimir Zworykin, en 1945, alors qu'il est 'Associate research director' au 'Radio Corporation of America (RCA) Laboratory' de Princeton :

> « La prévision d'une machine parfaitement précise, combinée à une force de déploiement paramilitaire rapide capable littéralement de déverser du pétrole sur les eaux agitées d'un océan, ou même d'allumer des feux ou de faire exploser des bombes, pourrait un jour fournir la capacité de perturber les tempêtes avant qu'elles ne se forment, les détourner des régions habituées, et par ailleurs de maîtriser le temps. ('A perfectly accurate machine forecast combined with a paramilitary rapid deployment force able literally to pour oil on troubled ocean waters or even set fires or detonate bombs might someday provide the capacity to disrupt storms before they formed, deflect them from populated areas, and otherwise control the weather'). » [Zworykin, 1945 **in** Fleming, 2007(a), p. 56]

J. von Neumann écrira à V. Zworykin qu'il l'approuvait complètement ('I agree with you completely'). N'y reconnaissait-il pas une application de sa maxime :

> « Nous nous devons de prédire tous les processus stables, et de contrôler tous les processus instables ('All stable processes we shall predict. All unstable processes we shall control') » [Neumann, 1945 **in** Fleming, 2007(a), p. 56] ?

[141] H. Wexler, qui se trouve à la tête de la Recherche météorologique de l'US Weather Bureau, est assurément un membre de l'élite scientifique états-unien, et un expert influent, proche du pouvoir fédéral (Fleming a retrouvé une photographie le montrant dans le Bureau ovale, en présence de J.F. Kennedy [Fleming, 2007(b), « Slide n° 13 »]). D'abord très impliqué dans l'opaque recherche sur projets des militaires (il travaille sur les impacts à grande échelle des bombes nucléaires, dans le cadre de programmes Atomic Energy Commission/Air Force/RAND Corporation au tournant des années 1950 – dont le célèbre 'Projet Sunshine'), il délivre dans les années 1961-62 de nombreux articles, rapports et conférences sur les « usages pacifiques » des sciences et, donc, comme nous l'avons dit, sur les risques liés aux armes météorologiques et climatiques.

'big technologies' et de l'accroissement de l'emprise humaine sur la nature – que les deux camps partagent. Khrushchev, face à eux, sera nécessairement réceptif à cet appel du pied américain. Dans son discours de 1962, Wexler rappelle un récent plaidoyer du chef du gouvernement soviétique en faveur de la maîtrise du temps, devant le Soviet suprême. [Kennedy, 1961, "Address to the United Nations" **in** Fleming (2010), p. 213; Edwards (2010), pp. 224-226; Fleming (2007a), p. 57].

En ce début de décennie 1960, l'heure est peut-être venue de réaliser le rêve formulé par le chercheur russe naturalisé américain, Zworykin, en 1945 :

> « Le but ultime à atteindre est l'organisation internationale des moyens d'étude des phénomènes météorologiques comme phénomènes globaux, et de diriger le temps mondial, autant que possible, de telle sorte que nous minimisions les dommages des troubles catastrophiques, et par ailleurs que nous soyons utiles au monde le plus possible, en améliorant les conditions climatiques où cela est possible. » [Zworykin, 1945 **in** Fleming, 2007(a), p. 56]

… Pourtant, les échecs répétés des expériences de terrain pour modifier le temps (à petite et moyenne échelles), la Détente et la Décolonisation (de nombreuses expériences de terrain avaient été menées en Asie du Sud-Est, et certains projets étaient envisagés dans des pays sous-développés), les capacités croissantes de détection des phénomènes atmosphériques et donc d'espionnage (depuis l'espace, notamment), les usages d'armes météorologiques au Vietnam, l'incrimination faite à des "faiseurs de pluie" se présentant comme des bienfaiteurs de l'agriculture d'avoir provoqué l'inondation de Rapid City en réalisant une expérience d'ensemencement de l'atmosphère (1972), le "tournant environnementaliste" et les mutations parallèles des programmes de recherche américains sur l'atmosphère, *etc.* auront raison de la presque totalité des programmes publics et privés de modification intentionnelle du temps et du climat, qu'ils soient belligérants ou civils. Au cours des années 1970, ils seront réduits à la portion congrue aux Etats-Unis, là où ils avaient le plus prospéré au cours des décennies précédentes. [Briday, 2014, p. 126] [142]

Nous venons de décrire le contexte d'énonciation des discours de Wexler ; précisons, à présent, le contexte de production des savoirs, et en particulier la décisive montée en puissance de la modélisation numérique. Dans les années 1950, la Guerre froide bat son plein. Dans les 'think tanks' américains, des équipes interdisciplinaires évaluent les possibilités d'attaque et de défense militaires, à l'aide des méthodes nouvelles (en particulier, la « recherche opérationnelle » des mathématiciens et physiciens, « l'ingénierie des

[142] Pour plus de détails sur les raisons plurielles de ce « désenchantement » au sujet de l'ingénierie atmosphérique dans les années 1970, voir notamment Kwa, 2001 et Fleming, 2010, "chapter 6", pp. 165-188.

systèmes » des ingénieurs, et le « management par projet » chargé d'organiser des projets gigantesques de 'Big Science & Technology' dans la lignée du Projet Manhattan [Johnson, 1997]). L'un des objectifs de ces 'think tanks' est la coordination des actions militaires. Un autre objectif majeur est la *construction de futurs*, toujours plus mathématisée et exhaustive, "la plus globale" possible, devant prendre en compte l'évolution des technologies nationales comme de celles de l'ennemi.[143] La fabrication de scénarios de destruction d'ozone par Wexler relève de ce second projet. Projet qui fait appel à la modélisation numérique.

Wexler fut l'un des premiers modélisateurs de l'atmosphère. Sur la photographie ci-dessous, datée de 1954 (Figure 17), il pose aux côtés de l'illustre John von Neumann, mathématicien de formation et l'un des pères de la (première) cybernétique et de la modélisation numérique (à commencer par la modélisation météorologique) dans les années 1950, et de Jule Charney, qui avait commis la première modélisation numérique du temps. En 1953, le 'Numerical Meteorology Project' de Princeton, dirigé par Charney, avait en effet atteint le but fixé par Neumann : réaliser par ordinateur une prédiction à 24 heures sur le territoire des États-Unis en moins de douze heures – depuis la collecte des données jusqu'à leur impression en passant par le traitement et les calculs. [Guillemot, 2007, p. 42 ; voir Edwards, 2010, "Chapter 6. Weather numerical prediction", pp. 111-137]

---

[143] Ces pratiques de modélisations informatiques, parfois au sujet d'objets globaux, avaient été initiées par J. Charney et J. von Neumann quelques années auparavant. A partir de la fin des années 1950, les modélisations des 'think tanks' du MIT ou de la RAND "intègrent" des paramètres sociaux – préfigurant les modèles des économistes des décennies à venir. Pour une histoire des modèles numériques, nous renvoyons à Armatte Michel & Amy Dahan, 2014 (à paraître).

Plusieurs historiens ont caractérisé, de manière plus générale, l'émergence d'un ensemble de pratiques scientifiques nouvelles, au sein des 'think tanks' de la Seconde guerre mondiale (Projet Manhattan) et la Guerre froide. Leur activité « mobilise la logique, les mathématiques, les statistiques, les modélisations et l'ordinateur naissant », et se veut avant tout « une manière scientifique et quantitative de gérer et de penser la guerre », écrit Dominique Pestre. La rationalisation des activités militaires accouche en effet de nouvelles épistémologies et de nouvelles pratiques sociales des sciences. Dans la lignée de l'organisation de la défense des côtes britanniques, une approche « *globale et systémique* » (et souvent « statistique » et/ou « probabiliste ») *des agencements hommes-machines* (par exemple, faire que l'ensemble "chaîne radar et observateurs au sol/gestion de l'information et centralisation des données/utilisation optimale des avions de chasse et de la défense antiaérienne", soit le plus efficace possible) se diffuse dans les états-majors et les universités d'après-guerre. On la désigne usuellement « recherche opérationnelle ». De plus, on voit se développer dans des *think tanks* de la Guerre froide tels que la RAND « des travaux cherchant, dans une lignée plus ou moins fidèle à la recherche opérationnelle et à la théorie des jeux », à créer une « science générale de la guerre » devant « rationaliser l'action des grands décideurs ». On peut les regrouper sous le terme générique d'« analyse des systèmes », dont nous retiendrons quatre caractéristiques :

i) la *transdisciplinarité* ;
ii) la *centralité des pratiques de modélisation numérique et de l'outil mathématique* (qui permettent notamment de « transcender » les disciplines, comme dans le cas de la cybernétique) ;
iii) une approche *prescriptive et dynamique des problèmes.* (« Une différence cruciale entre la recherche opérationnelle classique et la nouvelle « analyse des systèmes » développée à la RAND, propose D. Pestre, est que la seconde vise à définir, optimiser et choisir les dispositifs du futur, dispositifs conçus comme devant évoluer. Là où la recherche opérationnelle répond à la question : comment procéder alors qu'on dispose de tels équipements et personnels, l'analyse des systèmes se demande : quels équipements et stratégie devons-nous développer pour satisfaire les objectifs qui sont les nôtres ? ») ;
iv) enfin, contrairement au Royaume-Uni de 1941-44, les menaces belligérantes, et donc la pensée de l'analyse des systèmes dans l'armée états-unienne, sont vues par les Etats-Unis comme *se posant « à l'échelle planétaire »* (bien sûr pendant la Guerre froide, mais dès la Seconde Guerre mondiale). [Pestre, 2004 **in** Dahan & Pestre, 2004, pp. 206-219]

Figure 17 : Quelques collaborateurs du fameux projet de modélisation numérique du temps à l'aide d'ENIAC ('Electronic Numerical Integrator and Calculator'), en 1954. De gauche à droite : Harry Wexler, John von Neumann, M.H. Frankel, Jerome Namias, John Freeman, Ragnar Fjörtoft, Francis Reichelderfer et Jule Charney
[Fleming, 2007(b), « Slide n°8 »]

Après avoir utilisé la modélisation numérique pour prédire le temps, dans le sillage de Neumann et Charney, Wexler l'utilise à présent tout naturellement pour estimer les capacités de déploiement belligérant des deux grandes puissances. Dans les deux cas, les principaux intéressés, et les principaux financeurs, sont les militaires. [Rigby & Keehn, 1963, pp. 480-481]

L'hypothèse d'une destruction de l'ozone par les gaz d'échappement des fusées dans les brouillons de Wexler

Au sein des conférences « sur les possibilités de contrôler le temps » que H. Wexler avait données devant ses pairs météorologistes à Boston, Hartford et Los Angeles en 1962, la liste des techniques très spéculatives pour réchauffer, refroidir, ou restructurer l'atmosphère qu'il avait dressée en occupait la seconde partie. Auparavant, rapporte J. Fleming, le météorologiste avait pris soin de dresser un état de l'art de la physique radiative de l'atmosphère, ainsi que d'énoncer les risques que comporteraient les altérations du temps, de la circulation atmosphérique et de la trajectoire des tempêtes, en rappelant en outre que toute manipulation du climat constituerait également une manipulation des phénomènes météorologiques. [Fleming, 2007(a), pp. 56-57]

Mais, en introduction, H. Wexler avait également déclaré à son audience que l'Humanité modifiait par ailleurs déjà le temps et le climat, en altérant la composition de l'atmosphère terrestre, « que nous le sachions ou non » [Wexler, 1962 **in** Fleming, 2007(a), p. 57]. Or, dans la continuité de son expérience de pensée géoingénierique sur la possibilité de détruire la couche d'ozone à des fins belligérantes, parallèlement aux conférences qu'il donne sur les armes climatiques, Wexler va réfléchir à une éventuelle atteinte à l'ozone "par

inadvertance", soit si quelque expérience d'ensemencement volontaire en altitude tournait mal, soit des suites d'une augmentation du trafic de fusées. Sur un brouillon daté de 1962, année de son décès, Wexler écrit : « Les gaz d'échappement de fusées spatiales de plus en plus puissantes et nombreuses ensemenceront bientôt systématiquement la fine haute atmosphère avec de grandes quantités de produits chimiques qu'elle n'a jusqu'alors jamais accueillis, si ce n'est en petites quantités seulement ». Puis, il griffonne un schème de destruction de l'ozone stratosphérique par des fumées bromées issue de la combustion du carburant des fusées… Wexler venait de formuler la première hypothèse de corrélation (connue à ce jour) entre destruction de l'ozone et émissions anthropiques.[144] [Wexler, 1962, "Further Justification for the General Circulation Research Request for FY63", February 9, 1962, "Draft in Wexler Papers", box 18, 2 **in** Fleming, 2010, p. 219]

Sur la base de sa correspondance avec Sherwood Rowland, Paul Crutzen et Ralph Cicerone au cours des années 2000, J. Fleming a révélé que ces trois chimistes de l'atmosphère, qui ont été parmi les premiers à alarmer sur la destruction chimique de l'ozone par l'homme dans les années 1970, n'avaient jamais eu vent des travaux tardifs de H. Wexler (avant, donc, que l'historien, qui a exhumé les documents manuscrits et dactylographiés du météorologue américain, ne les leur montre finalement). Dans l'esprit de Fleming, si l'intuition de Wexler avait pu faire l'objet d'une publication avant sa mort, ou si elle avait été relayée par le chimiste de Caltech Oliver Wulf, par exemple (au jugement duquel Wexler avait soumis son hypothèse sur les navettes spatiales, et demandé quel « déozoniseur » il privilégierait s'il devait essayer de détruire la couche d'ozone), elle aurait « certainement retenu l'attention », et aurait « peut-être » conduit à élaborer une première alerte à la destruction anthropique de l'ozone stratosphérique et une « réponse politique » avant 1970-71. [Fleming, 2010, p. 222]

Que penser du récit uchronique de J. Fleming ? L'historien dit, et montre, qu'il a retrouvé dans les brouillons de Wexler ce qu'il appelle « les équations fondamentales de la théorie moderne de la destruction chimique de l'ozone », dont une corrélation particulière impliquant l'élément brome Br. D'après lui, elles auraient été listées par Wexler, d'abord à la

[144] J. Fleming précise que H. Wexler s'inscrit de la sorte dans la lignée d'études "très Guerre froide", rendues publiques ou gardées secrètes, qui avaient été menées au cours des mois précédents :

> Wexler "cited a 1961 study by the Geophysics Corporation of America on possible harm to the Earth's upper atmosphere caused by the oxidizers in rocket fuel. He was also aware that [American] operations Argus [(1958. Explosion of three Nuclear Bombs in the *Van Allen Belt*)] and Starfish [(1962. A large nuclear device was exploded at 250 miles altitude that trapped new electrons in the magnetosphere)], Project West Ford [(1961-63. A ring of 480,000,000 copper dipole antennas was placed in orbit to create an "artificial ionosphere" above the Earth, in order to facilitate global radio communication)], and Project High Water [(1962. It sought to determine the effect of a large volume of water suddenly released into the ionosphere. The project answered questions about the effect of the diffusion of propellants in the event that a rocket was destroyed at high altitude)] constituted recent significant interventions in the near-space environment that were accompanied by unknown and unquantified risks." [Fleming, 2010, p. 219]

recherche d'un potentiel déozoniseur, puis pour formuler l'hypothèse d'une destruction de l'ozone par les gaz d'échappement d'un engin volant – en l'occurrence, la fumée bromée issue de la combustion du carburant des fusées. Quoiqu'il en soit, l'ensemble est resté à l'état de brouillon noirci dans l'urgence (voir les photographies desdits brouillons manuscrits de Wexler datés de janvier 1962, publiées par Fleming ; Fleming, 2010, "Figures 7.6 & 7.7", p. 221). Wexler aurait projeté de soumettre l'hypothèse à publication, mais décéda d'un arrêt cardiaque le 11 août 1962. Cette théorie dormit ensuite parmi les autres archives de Wexler – si bien que Rowland, Crutzen et consorts n'avaient guère de chance de tomber dessus. [Fleming, 2007 (b), pp. 2 & 6-7 & Slides 18-21 ; Fleming, 2010, pp. 218-223]

Il nous est toutefois difficile de suivre J. Fleming dans les éloges qu'il fait du travail de Wexler de 1962, qu'il juge des plus novateurs, des plus visionnaires. Fleming a certes maintes fois démontré le caractère éclectique et effervescent de Wexler, qui fut un laboratoire d'idées à lui seul. Mais, l'*originalité* de l'hypothèse d'un lien entre gaz d'échappement des fusées et destruction de l'ozone est discutable. D'abord, l'idée a tout aussi bien pu être lancée par l'un de ses collègues. De plus, la contribution d'Oliver Wulf à l'élaboration de cette hypothèse avait peut-être été décisive. Fleming rapporte en effet que Wulf et Wexler échangèrent de nombreuses lettres sur le sujet entre décembre 1961 et avril 1962. [Fleming, 2010, p. 220]

Enfin et surtout, on ne saurait accorder un caractère "scientifique" à la proposition de Wexler telle que nous la présente Fleming. Dans les brouillons que Fleming présente comme sa preuve d'historien, Wexler n'explique pas en détail le rôle chimique précis de ce « carburant de fusées », et comment il s'insère dans une chimie générale de l'ozone stratosphérique. En d'autres termes, il ne discute pas de manière exhaustive le "comment" du processus dans un champ d'études constitué. Or, il s'agit là de la marque du travail scientifique. Il ne propose pas non plus un choix informé de constantes de réactions chimiques, sur la base de mesures *in situ* dans la stratosphère (ou, *a minima*, d'après un calcul théorique). Conséquence ou non de ces manquements, ni O. Wulf, ni S. Chapman, avec lequel Wulf avait discuté *de visu* au sujet de l'hypothèse de Wexler en avril 1962, ne chercheront à relayer cette théorie dans le monde académique. S'ils ne jugèrent sans doute pas cette hypothèse "environnementale globale" fantaisiste, ils ne trouvèrent en tout cas pas non plus, manifestement, d'argument scientifique sérieux pour l'étayer. [Fleming, 2010, pp. 219-222]

Rares furent, en fait, les scientifiques à formuler des hypothèses "environnementales" de destruction anthropique de l'ozone au cours des années 1960. On en trouve simplement une poignée, relatives aux essais nucléaires ou à la vapeur d'eau émise par les avions

supersoniques.[145] Bien que, comme nous l'avons montré, la stratosphère eût été fragilisée par les études belligérantes sur l'atmosphère, qui la décrivaient comme *contaminée massivement* par le vivant au sol, par les volcans, par les technologies humaines (essais nucléaires, fusées), et couplée à des processus de *moyenne temporalité* (changement climatique) voire de faible temporalité (météorologie), *la culture scientiste, belligérante et technophile très marquée des scientifiques de l'atmosphère de la Guerre froide était peu propice à la réflexivité environnementale*. La remarque vaut pour l'ozone comme pour le changement climatique, ce dernier étant vu par les scientifiques de l'atmosphère des années 1960 comme un programme de recherche intéressant, voire un simple problème qui devra être résolu, plutôt qu'une source d'inquiétude devant mobiliser la société toute entière – attitude qui contraste avec celle, souvent plus "militante" à l'égard des problématiques environnementales, d'écologues et de biologistes d'alors, en particulier de biologistes de la conservation, comme l'écrit l'historien de l'environnement Joshua Howe dans son histoire de « l'environnementalisme américain » (1957-1992) ». [Howe, 2010, pp. 95-98]

En ce qui concerne les thèses sur un impact des gaz d'échappement des *fusées et navettes spatiales* sur l'ozone, elles furent presque inexistantes dans la littérature scientifique des années 1960, y compris dans les travaux d'expertise "environnementale" qui accompagnèrent la conquête spatiale.[146] Elles ne jouèrent par conséquent aucun rôle dans la

---

[145] Entre 1964 et 1966, le physicien John Hampson, alors au 'Canadian Armaments Research and Development Establishment' du Québec, émit deux hypothèses de destruction anthropique possible de l'ozone stratosphérique. La première origine envisagée était imputable aux explosions nucléaires – hypothèse semblable, donc, à celle de l'AEC évoquée plus haut. Hampson reprendra cette hypothèse une décennie plus tard, contribuant ainsi à lancer l'affaire dite de l'Hiver nucléaire – qui sera néanmoins centrée sur le risque d'un changement climatique plutôt qu'une destruction de l'ozone (*cf.* Hampson J., 1974, "Photochemical war on the atmosphere". *Nature* **250** (5463), pp. 189–191 ; voir Chapitre 6). L'autre hypothèse que soumit Hampson au jugement de ses pairs concernait la potentielle destruction de l'ozone stratosphérique par la vapeur d'eau émise par les avions supersoniques ('SuperSonic Transport' ou 'SST'), en 1965 [*Social Learning Group*, 2001, « Appendix 2B.2 »]. Au cours de la même année, Hampson n'avait-il pas publié un article sur la destruction catalytique de l'ozone par les HO_x (*cf.* Hampson J., 1965, « Chemiluminescent Emission Observed in the Stratosphere and Mesosphere » **in** *Les problèmes météorologiques de la stratosphère et de la mésosphère*, Paris: Presses Universitaires de France, p. 393) ? Cette hypothèse de Hampson était semblable à celle griffonnée en 1962 par Wexler sur sa « pierre de Rosette » (périphrase qu'utilise Fleming pour désigner le brouillon de Wexler !) : l'agent catalytique, composés bromés ou chlorés chez Wexler, devenait la vapeur d'eau, alors que les gaz d'échappement de SST remplaçaient ceux des fusées.

D'autres mécanismes de réactions entre OH, HO_2 et O_3 seront proposés dans Hunt, 1966, ainsi que de nouvelles constantes de réactions devant concilier plus efficacement les quantités d'ozone prédites et observées. Tout comme le Canadien Hampson, l'Australien Hunt, de l'"Australian Weapons Research Establishment', étudiait la haute atmosphère, du fait de l'intérêt de son institution pour le problème de "ré-entrée" des missiles balistiques dans l'atmosphère. [P. J. Crutzen, 1974, p. 1569; Dotto & Schiff, 1978, pp. 33-37] Ni pour Hampson, ni pour Hunt, il ne s'est agi de lancer une alerte à la destruction anthropique de la couche d'ozone.

[146] On peut relever les travaux des « physiciens » J. Pressman, W. Reidy and W. Tank, qui sont signalés dans une revue de vulgarisation, le *New Scientist*, en 1963. Leur présentation, donnée cette année-là à l'"Institute of the Aerospace Sciences', avait mené le journaliste à conclure :

> "In the rarefied layers of the upper atmosphere the exhaust gases of giant rockets may greatly alter the chemical composition. Interference with the Earth's natural radio Mirror, the ionosphere, is to be expected, and disturbances of the blanket of ozone surrounding the Earth could cause changes at its surface."

De manière très imprécise, l'auteur de l'article évoquait les effets que les gaz d'échappement des fusées pourraient avoir « sur la structure des températures de l'atmosphère », les « graves coups de soleil » éventuellement induits, ou encore une possible « contamination de l'ozonosphère » dont il ne nous dit rien [Stubbs, 1963]. (Pourtant, un

construction de l'alerte à la destruction de l'ozone par les gaz d'échappement des avions supersoniques. Nulle mention n'est faite des travaux sur la destruction de l'ozone par les fusées dans les articles de Harrison et Johnston de 1970 et 1971 sur l'impact des vols SST. *L'inverse se produisit* : c'est le choc de l'alerte à la destruction massive de l'ozone par les SST, en 1970-71, qui poussera quelques scientifiques à s'interroger sur les impacts des vols de fusée sur la couche d'ozone. La question fera l'objet de discussions, parfois vives, au sein de la communauté scientifique, entre 1972 et 1974, avant de redevenir un sujet très secondaire dans la littérature (voir Chapitre 6).

rapport du MIT de 2001 accordera à Pressman une ligne de sa « chronologie du problème de la destruction de l'ozone » : "1962 – Pressman (United States) is concerned that rockets would harm the upper atmosphere" [*Social Learning Group*, 2001, « Appendix 2B.2 »])

Les travaux des années 1960 sur les risques environnementaux des engins pouvant transiter dans la haute atmosphère furent manifestement très peu nombreux. Dans un rapport de 1999 pour l'"U.S. Air Force Space and Missile Systems Center Environmental Management Branch', les auteurs évoquaient seulement des travaux sans lien présumés, à l'époque, avec la destruction de l'ozone (Ex : "The effects of HCl on H2-O2 flames has been investigated in terms of potential flame-inhibition effects *(Blackmore et al., [1964], Butlin et al., [1968])*, as have other halogen-containing molecules. However, the consumption of HCl and production of other chlorine-containing molecules [(which would be later be known as ozone-depleting substances)] were not monitored in those studies."). En fait, l'expertise environnementale des effets des gaz d'échappement des fusées ne fut véritablement entreprise par l'Etat fédéral qu'en 1969, avec le vote du 'National Environmental Policy Act' (NEPA), qui comprenait un volet sur les impacts des technologies américaines au-delà du territoire américain, l'"Executive Order 12114 - Environmental Effects Abroad of Major Federal Actions'. Mais, l'expertise portait sur la « qualité de l'air » ("In compliance with the NEPA of 1969 and its Executive Order 12114, [the NASA and the] Department of the Air Force have been actively engaged in studies to determine the effects of launch vehicles on air quality." [Tyrell *et al.*, 1999, pp. 51, 1 & 104]).

C h a p i t r e 3 . Les origines "pacifiques" d'un réseau mondial de surveillance de la composition chimique de l'atmosphère

Dans le Chapitre 2, nous avons rappelé le rôle moteur que des études financées par les militaires britanniques, soviétiques et états-uniens avaient joué dans le regain d'intérêt pour le changement climatique lié aux émissions anthropiques de CO_2, et décrit leur fonction dans la quadruple mutation de la stratosphère au cours des années 1940-60. Les recherches des scientifiques sur l'environnement physique à grande échelle avaient indubitablement été grandement influencées par les financements fléchés par l'armée. Pour autant, le tableau que nous avons dressé n'est pas manichéen. D'abord, tous les intérêts des scientifiques n'étaient pas coextensifs à ceux des militaires. Ensuite, les physiciens étaient certes pour la plupart de bons patriotes, se retrouvant face à un ennemi terrifiant (l'Allemagne nazie, le Japon-kamikaze, l'URSS stalinisée) ; mais, même avec un profil de "non-objecteur de conscience", ils avaient aussi su profiter d'opportunités de servir leur science, comptant bien "détourner" une petite part des titanesques financements alloués à la Défense afin de répondre à des questions scientifiques qui n'intéressaient pas nécessairement les militaires.

Au cours des décennies d'après-guerre, certains physiciens d'élite états-uniens, devenus proches du pouvoir exécutif, cherchent en outre à concilier recherche militaire et coopération scientifique transnationale, soit dans le cadre d'échanges avec les chercheurs des pays alliés, soit en vue de renouer des liens avec une communauté russophone qui prolonge sa glorieuse tradition d'études géophysiques sur la haute atmosphère, l'espace et l'Arctique (dans un cadre principalement belligérant également, à présent, bien évidemment), et dont les membres continuent à fréquenter les réunions des commissions de l'ICSU – en particulier dans les périodes où les tensions entre les deux Blocs se distendent (voir Bojkov, 2010). Dans le chapitre précédent, nous avons ainsi montré que H. Wexler avait utilisé son autorité de Directeur de la Recherche météorologique de l''US Weather Bureau' et de météorologiste internationalement reconnu, afin de promouvoir des collaborations scientifiques transnationales sur les satellites météorologiques, qui se présentaient comme "pacifiques", et même "pour la paix".

Aux yeux des scientifiques, programme "pacifique" rime parfois avec *progrès technologique* bénéfique "pour l'humanité". Il rime, par ailleurs, souvent avec science *fondamentale*. Précisons que, dans les deux cas, entre 1945 et ~1970, lorsque ces programmes

"pacifiques" sont à la charge d'une institution nationale, des financements militaires sont le plus souvent mobilisés (et sont même parfois majoritaires), comme nous l'avons déjà vu avec le NCAR (créé en 1960, il fut en effet initialement financé, non seulement par la NSF (National Science Foundation), mais également par le 'Department of Defense' et l''Office of Naval Research' (ONR) [Howe, 2010, p. 47]). Enfin, un autre cas de coopération pacifique multilatérale se développa à partir des années 1950, dans un champ qui n'a jamais été hautement tributaire des financements militaires : le devenir atmosphérique des *pollutions anthropiques* industrielles. Il s'agissait, en l'occurrence, d'un programme sur le transport "transfrontière" de polluants acides.

Nous n'entendons pas par « pacifique » une science qui n'aurait plus aucun lien économique ni épistémologique avec les programmes militaires. L'ambiguïté du caractère "pacifique" des programmes présentés comme tels par les élites scientifiques et politiques au cours des décennies 1940-60 a déjà été démontrée à de nombreuses reprises par les historiens. L'ambivalence fut particulièrement patente dans le cas des programmes sur l'environnement physico-chimique à grande échelle, comme l'ont largement documenté R. Doel, P. Edwards, *etc*. Par exemple, comme l'a écrit R. Doel, l'Année géophysique internationale (AGI ; 1957-58) « ne fut pas la remarquable exception aux hostilités que beaucoup de commentateurs de l'époque avaient voulu voir, mais était intimement connectée à des objectifs de sécurité nationale aux yeux des nations dominantes impliquées. C'était particulièrement le cas aux Etats-Unis. » Ceci signifie, d'une part, que les recherches de l'AGI pouvaient servir des programmes de surveillance, et surtout de développement de technologies, qui n'avaient pas pour unique vocation de garantir la paix (et pour cause, les méthodes privilégiées alors pour maintenir la paix étaient le plus souvent les méthodes, hautement ambiguës, de surveillance mutuelle et de dissuasion). Ceci signifie, d'autre part, que de formidables contributions furent rendues « à la politique extérieure » des Etats-Unis par les sciences de l'atmosphère et, plus généralement, de la Terre. Ceci s'était fait avant la percée des problématiques environnementales dans les arènes médiatiques et diplomatiques dans les années 1970 (percée que ces sciences vont bien sûr encourager également). Dès l'immédiat après-guerre, en effet, alors que, d'un côté, « les modèles traditionnels d'internationalisme scientifique persistent », qu'ils soient prolongés au sein de l'ICSU ou qu'ils s'incarnent dans les nouvelles organisations des Nations Unies (R. Doel cite l'UNESCO (United Nations Educational, Scientific, and Cultural Organization ; 1945-…)), d'un autre côté, les sciences physiques de la Terre posent d'autres questions (retombées des essais nucléaires atmosphériques, réchauffement des pôles, composition et dynamique de la haute atmosphère, *etc.*), qui suscitent également l'invention de nouvelles diplomaties [Doel, 2003, pp. 645-647].

Ainsi, l'AGI, à laquelle participèrent soixante-sept nations, voire même une centaine pour sa composante atmosphérique, rapporte P. Edwards, fut utilisée par les deux superpuissances afin de faire la promotion de leur puissance technologique *et* de leur engagement en faveur d'une coexistence pacifiée. En ce qui concerne le rapport des scientifiques à leurs élites politiques, P. Edwards voit dans l'AGI l'incarnation d'une « orientation mutuelle », où « la science serait utilisée pour encourager une vision particulière de l'ordre du monde » (notamment, grâce à la Bombe, aux télécommunications, à la télésurveillance), mais où, « en échange, les scientifiques pourraient mieux faire la promotion de la leur » [Edwards, 2006, pp. 245-246]. Toutes ces ambivalences que nous venons de présenter seront également omniprésentes dans la plupart des programmes de mesure et d'élaboration des savoirs que nous allons décrire dans ce chapitre.

Ajoutons, pour finir, que les échanges seront favorisés dans le contexte de relative « Détente » des années 1960 (disons, après la crise des missiles de Cuba de 1962)… Avant que, finalement, « sur le long terme » (à partir des années 1970), l'implication des scientifiques de l'environnement physique global ne produise en retour « des pressions auxquelles les gouvernements seront obligés de répondre », notamment au sujet de la destruction de l'ozone et du changement climatique (comme nous le verrons dans les Parties B et C). [Edwards, 2006, p. 246]

Pour ce Chapitre 3 sur la collaboration scientifique "pacifique" internationale sur l'atmosphère, nous avons pris le parti de nous focaliser sur la construction de réseaux de mesure, en particulier sur les réseaux de l'ICSU, et plus encore de l'OMM. Après sa création en 1950, et notamment en s'impliquant fortement dans l'AGI, l'organisation onusienne est en effet devenue rapidement le principal acteur de construction et de coordination des principaux réseaux de surveillance de l'atmosphère. En particulier, ont été initiés au cours des premières décennies de Guerre froide les deux réseaux de mesure de l'OMM qui fusionneront en 1989 dans un programme de surveillance cher aux chimistes de l'atmosphère : le GAW ('Global Atmosphere Watch').

Notre premier sous-chapitre fait, pour l'essentiel, l'histoire de la première composante du GAW : le 'Global Ozone (O_3) Observing System' (GO3OS). Ce travail s'inscrit principalement dans la lignée des travaux de P. Edwards sur la construction des sciences de l'environnement comme « globalisme infrastructurel ('infrastructural globalism') ». A la construction d'un premier 'web' OMM pour la météorologie, le 'World Weather Watch' (WWW), décrit par P. Edwards – initié dans les années 1950, stimulé par l'AGI, puis officialisé comme organe de l'OMM en 1967 (*Cf.* Edwards, 2006 & 2010) –, répond la construction de "notre" 'web' OMM cartographiant la composition atmosphérique, le 'Global

Atmosphere Watch' (GAW ; 1989-…) – initié lors de l'AGI avec la création du GO3OS, en 1957. Il s'agit pour nous de montrer avec le GO3OS, cette fois, comment « on fabrique des données globales, "des données pour agrémenter le globe" ('making global data') », en les compilant le plus largement possible (en créant de nouvelles stations de mesure, avec le personnel associé, dans des lieux épars, dans un maximum d'Etats), *et* comment « on fabrique le caractère mondial (ou « global », « universel ») des données ('making data global') », par le biais de procédés de centralisation des données, de standardisation des appareils de mesures, d'échanges permanents d'information, *etc.* (nous paraphrasons ici P. Edwards ; Edwards, 2010). Dans ce Sous-chapitre 3.1, nous nous soulignons l'activisme de G. Dobson, S. Chapman et M. Nicolet, et l'entrée décisive de la jeune OMM dans l'élaboration de la science de l'ozone, par le biais de l'AGI. Nous décrivons en outre les écueils que rencontrèrent les défenseurs du GO3OS dans l'implication des Soviétiques, la principale difficulté résidant dans la capacité à "accorder" les spectromètres à filtres d'interférence d'URSS aux spectromètres occidentaux, les "Dobson".

Notre Sous-chapitre 3.2 décrit ensuite la construction de l'autre jambe du GAW, le BAPMoN ('Background Air Pollution Monitoring Network'). Ce réseau, créé en 1969, participera à partir de 1979 au programme de mesures mondiales sur le SO_2, principal polluant responsable des pluies acides (d'abord en Europe, en soutien du programme EMEP ('European Monitoring and Evaluation Programme')). En fait, notre sous-chapitre se donne des ambitions plus vastes, puisqu'il décrit également le rôle joué par la question des pluies acides dans la stimulation de programmes nationaux multi-polluant multi-effet ; et, surtout, son rôle joué dans l'invention de réglementations internationales précoces sur les polluants atmosphériques, rédigée sous la Convention LRTAP ('Long Range Transboundary Air Pollution'), signée en 1979 par les pays européens les plus pollueurs, l'URSS et les deux Etats nord-américains. En d'autres termes, nous ne nous limiterons pas au « globalisme infrastructurel », qui concerne avant tout les scientifiques, mais nous regarderons également (certes, d'autant plus furtivement ici que les pluies acides ne sont pas des pollutions "globales") d'autres « globalismes », du côté des institutions, des acteurs, des outils et des pratiques dans l'arène politique et l'arène experte. Ce dernier sous-chapitre de la Partie A fera, en outre, le lien avec les années 1970 puis les années 1980-2000, que nous traitons respectivement dans les Parties B et C.

3.1. La construction ICSU/OMM d'un système d'observation globale de l'ozone

Dobson et la création de l'"International Ozone Commission' (IO3C ; 1948-...)

Au cours de la Seconde guerre mondiale, les activités et communications entre scientifiques des différents pays sont limitées. L'expansion du réseau de mesures d'ozone, alors principalement le fait d'une coopération européenne, est stoppée. Par exemple, les trois spectrophotomètres Dobson achetés par décision du Comité sur l'ozone de IUGG ('International Union of Geodesy and Geophysics' ; 1919-…), lors de sa Sixième Assemblée de 1936, ne seront distribués qu'à la fin de la guerre. Outre les difficultés de communication et de coopération transnationale, l'autre raison de la mise entre parenthèse du programme sur l'ozone réside dans le déplacement massif des intérêts scientifiques des Etats vers des connaissances militairement stratégiques. Le primat est donné aux études sur la vapeur d'eau stratosphérique et/ou la météorologie stratosphérique, plutôt qu'aux mesures d'ozone. Entre le milieu des années 1930 et 1951, seules douze stations effectuent des mesures spectroscopiques d'ozone pendant plus de trois ans d'affilée ; « et encore : de manière irrégulière » (à l'exception des séries "immuables" d'Arosa, et, « pour certaines périodes, des séries d'Oxford, de Tromso (Norvège) et de Zi-Ka-Wey (Shanghai) », précise R. Bojkov dans son histoire de l'IO3C). Le programme sur l'ozone est ralenti, même si les quelques rares spécialistes de l'ozone cherchent à perpétuer la tradition, au sein des communautés nationales [Bojkov, 2010, pp. 20-23].[147] Après-guerre, la coopération internationale sur l'ozone reprend. Ayant peu d'enjeux pour les politiques de défense, l'ozone est présenté comme un objet de recherche "pacifique". L'objectif principal est la coordination des mesures du vieux pôle européen avec l'URSS et les Etats-Unis. Du fait de

[147] Au Royaume-Uni, en Inde, en France et en Allemagne, des chercheurs poursuivent – mais plutôt en vase clos, à l'échelle nationale – le programme d'étude sur divers aspects *théoriques* relatifs à la distribution de l'ozone. Dans son histoire de l'IO3C, Bojkov prend l'exemple de la recherche allemande sur l'ozone qui comptait, en la personne de Paul Götz, un membre du Comité sur l'Ozone de l'IUGG, et perpétua ses activités sous le Troisième Reich :

> On "17-18 April 1944 despite the War situation one of the Committee on Ozone members (Paul Götz) participated in Tharandt (Germany) at an important by its content two-day Special meeting on Ozone with more than 25 participants presenting 14 papers (Ozone, 1944) which was organised together with Prof. Helmut Weickmann. Götz provided an extensive review on the state of ozone research with emphasis on the possibilities offered by the Umkehr method and the newly established by German colleagues very cold stratosphere for explaining the observed annual, latitudinal and VO3Ds. There were basic reviews of photochemistry (O. Hoelper, E. Schröer); first VO3D direct measurements by stratospheric balloons establishing that the ozone maximum at middle latitudes is at ~22km, and the role of turbulence (Erich and Victor H. Regener); weather systems and related ozone changes (Moser); radiation and stratospheric temperature (Rudolf Penndorf); strato-tropospheric transport, and tropospheric ozone (Alfred and Hedwig Ehmert); and on the first optical-filter radiosonde (Dietrich Stranz). The high scientific levels of the reports are impressive even today. This was practically the first ozone meeting with so detailed discussions on basic issues of ozone photochemistry, vertical and horizontal distribution and changes, without spending unnecessary time on instrumentation and methods of measurements (*sic*)." [Bojkov, 2010, p. 21]

leur conquête technologique poussée de l'atmosphère, les deux puissantes scientifiques hégémoniques sont en capacité de combler rapidement leur retard sur l'Europe.

Avant que l'ONU ne rentre dans la partie, l'ICSU réactive son programme sur l'ozone. Depuis 1933 à la charge du Comité sur l'ozone de l''International Union of Geodesy and Geophysics' (IUGG, un organe de l'ICSU), il est confié en août 1948 à une commission spéciale nommée l''*International Radiation Commission*' (abrégée sous le sigle IOC, puis *IO3C*), au cours de la Septième assemblée de l'IUGG qui se tient à Oslo. Le Comité sur l'ozone, créé en 1933, et le Comité sur les radiations, créé en 1928, disparaissent en 1948 dans une 'International Radiation Commission' (IRC) de l'IUGG. L'IO3C, créée la même année du fait de la reconnaissance de l'importance du programme de mesures sur l'ozone, devient donc quant à elle la seconde « commission » de l'ICSU après l'IRC. Les deux commissions deviendront deux des dix sous-composantes actuelles de l'association IAMAS ('International Association of Meteorology and Atmospheric Sciences', de l'IUGG).[148] [Ohring *et al.*, 2009, p. 1670]

A ses débuts, l'IO3C est largement dominée par les Européens. Oxford et le Royaume-Uni demeurent le centre névralgique du réseau de mesure d'ozone, alors que la France, l'Allemagne et la Suisse concentrent la presque totalité des autres figures influentes de la science de l'ozone. L'IO3C se compose initialement des seuls G.B. Dobson (Président ; Oxford), Sir Charles Normand (Secrétaire ; Oxford), et six autres membres : Daniel Chalonge

[148] Lors de la première 'IUGG General Assembly' (Rome, 1922), la 'Section de Météorologie' devint une des sections constitutives de l'IUGG. Lors de la quatrième 'IUGG General Assembly' (Stockholm, 1930), elle se mua en 'International Association of Meteorology'. Puis, cette association prit le nom d''International Association of Meteorology and Atmospheric Physics' lors de la onzième 'IUGG General Assembly' (Toronto, 1957). Elle sera rebaptisée 'International Association of Meteorology and Atmospheric Sciences' (IAMAS) en 1993. En outre, l'IO3C trouve ses racines dans une requête faite en 1930, lors du premier congrès de la 'Solar Radiation Commission', une commission de l'IUGG (qui n'est pas encore une composante de l'ICSU), de constituer une Sous-commission pour l'ozone atmosphérique. L'année précédente a vu la tenue de la Première Conférence sur l'Ozone, à Paris, à l'initiative de Charles Fabry (1867-1945). Nous n'exposerons pas les différentes reconfigurations et hybridations entre les institutions que nous avons évoquées. Depuis 1993, l'IO3C (1948-…) est une « commission » de « l'association » IAMAS (dont les origines remontent à 1922, sous l'égide de Sir Napier Shaw, mais nommée comme telle depuis 1993). L'IAMAS est l'une des huit associations de « l'union scientifique » IUGG (1919-…), l'une des trente-et-une unions de l'ICSU (1931-…) d'aujourd'hui.

Les commissions de l'IAMAS, et des institutions qui l'ont précédée, cherchent à regrouper à travers le monde des scientifiques de premier plan, qui se sont spécialisés dans l'un des domaines des sciences de l'atmosphère (l'IAMAS divise aujourd'hui ces sciences en dix sous-disciples – *cf.* les dix sous-composantes, ou « commissions », de l'IAMAS). La plupart des grands pontes de la météorologie, de la science du changement climatique, de l'aéronomie et de la chimie atmosphérique globale se sont succédés à leur tête. Junge a ainsi été Président de l'IAMAS en 1975. Il avait auparavant évolué en son sein entre 1967 et 1975, comme Président de la 'Commission on Atmospheric Chemistry and Radioactivity' (CACR ; devenue 'Commission on Atmospheric Chemistry and Global Pollution' en 1971). Quant à l'IO3C, sa présidence a été confiée à Dobson, à K.R. Ramanathan, à Gérard Mégie, ou encore à Ivar Isaksen. Et, elle a compté parmi ses membres les plus importants spécialistes historiques de l'ozone (Brewer (R-U/Canada), Dobson (G-B), Ramanathan (Inde), Harry Wexler (USA)), dont ceux de l'aventure de l'expertise sur sa destruction anthropique de l'ozone, que nous allons suivre dans les chapitres suivants : M. McElroy (USA), P.J. Crutzen (Pays-Bas), M.J. Molina (USA), F.S. Rowland (USA) et Daniel Albritton (USA), I. Isaksen (Norvège), D.H. Ehhalt (Allemagne de l'Ouest), Guy Brasseur (Belgique/USA), Donald Wuebbles (USA), Richard Stolarski (USA), Susan Solomon (USA), R.D. Bojkov (Canada/Bulgaria), Gérard Mégie (France). [Ohring *et al.*, 2009]

(Observatoire de Paris), F.W. Paul Götz (Observatoire d'Arosa), Kalpathi Ramakrishnan Ramanathan (Physical Research Laboratory, Ahmedabad, Inde), E. Tönsberg (Observatoire de Tromsø, Norvège), Etienne Vassy (Sorbonne, Paris) et Oliver R. Wolf ('US Weather Bureau', Washington DC ; à ne pas confondre avec le chimiste de Caltech Oliver R. Wulf du Chapitre 2). Les Britanniques constituent donc le noyau dur de la commission, avec un président anglais et un secrétaire écossais, tous deux d'Oxford. De plus, l'IO3C reçoit des contributions financières d'Oxford et de la 'Royal Society'.[149] En 1948, les objectifs de l'IO3C sont définis comme suit :

> *« Organiser une recension générale ('a survey') sur l'ozone pour l'Europe de l'ouest, et dans le même temps aider à l'implantation des stations d'ozone dans d'autres parties du monde lorsque l'opportunité se présente », et « guider les opérations des différentes stations afin qu'elles soient conduites de manière comparable »* [Ozone, 1948 **in** IUGG *Procès-verbaux des séances de l'Association de Météorologie, Publication AIM No.9/b, 32-4, Bruxelles, 1952* **in** Bojkov, 2010, p. 22]

Toutefois, les échanges d'instruments et de savoir-faire, la standardisation des instruments de mesures, et les exercices d'intercomparaisons entre les différents instruments de mesure sont dans un premier temps le résultat d'une collaboration presque exclusivement entre Européens. Il faudra attendre les préparatifs de l'Année géophysique internationale (AGI), à la fin des années 1950, pour que des tentatives d'extension du réseau de mesures d'ozone standardisées soient réalisées par-delà l'Europe occidentale, sous l'impulsion de l'IO3C, et du Président du Comité Spécial de l'AGI, Sydney Chapman.

---

[149] Bojkov, 2010 rapporte :

> "In the next three years [after its creation] the IO3C carried in Oxford the rebuilding of nine pre-war instruments to the new standard design using photomultiplier, and a total of 24 newly build instruments were calibrated and com- pared in order to start the European ozone study with updated instruments. In the meantime the meteorological Offices at number of countries had ordered new instruments i.e. Belgium (1), Canada (4), India (3), Italy (3), Japan (1), Spain (1), UK (3), and USA (5). Also the University of Uppsala (1) and the IO3C by itself purchased 2 more instruments for eventual loan to stations of interest. At that time a new Dobson spectrophotometer costed 1275 £. IO3C was getting each year a grant of ~300 £ for clerical assistance at Oxford related to its main task – the west European ozone survey with participation of 16 stations. Some similar annual grants were made also available by the Royal Society London. The President and Secretary were not paid extra although they were working full time on upgrading and calibrating each one of the produced instruments." [Bojkov, 2010, p. 22-23]

Pour plus de détails sur l'histoire de l'IO3C, on se référera à Bojkov, 2010, une histoire de l'IO3C intitulée "The International Ozone Commission (IO3C) – Its history and activities related to atmospheric ozone", réalisée par son ancien secrétaire (de 1984 à 2000), le bulgare naturalisé canadien Rumen Bojkov. En outre, l'*American Meteorological Society* a consacré un *« Bulletin »* spécial à l'IAMAS, intitulé "Radiation and Ozone: Catalysts for Advancing International Atmospheric Science Programs for over Half a Century" : Ohring *et al.*, 2009.

Chapman et Nicolet parmi les têtes pensantes de l'Année géophysique internationale (AGI ; 1957-58)

De nombreux historiens des sciences physiques de l'environnement global ont souligné l'importance de l'Année géophysique internationale (AGI ; 1957-58) dans la construction de réseaux internationaux de mesures sur l'environnement global (Howe, 2010, pp. 30-39 ; Edwards, 2010, Chapter 8 ; Grevsmuehl, 2012).[150] Les auteurs STS Eva Lövbrand, Johannes Stripple et Bo Wiman n'hésitent pas à faire de l'AGI, qui a réuni en tout et pour tout 60 000 scientifiques de 67 nationalités et vu la création de 2000 stations météorologiques, la première pierre à l'édification d'une Science du Système Terre, processus que le climatologue allemand Hans J. Schellnhuber, l'un des premiers théoriciens de l'Anthropocène au début des années 2000, a qualifié de « Seconde Révolution copernicienne » à la fin des années 1990 [Schellnhuber, 1999 **in** Lövbrand *et al.*, 2009, p. 10 ; [Nicolet, 1982, p. 229]. Ce pompeux concept de « Seconde Révolution copernicienne », que nous discuterons dans le Chapitre 9, fait écho à l'emphatique déclaration de l'un des participants à l'aventure de l'AGI, le géophysicien Hugh Odishaw, qui avait décrit l'évènement de dix-huit mois comme

> « l'activité la plus pacifique menée par l'humanité depuis la Renaissance et la Révolution copernicienne ('the single most peaceful activity of mankind since the Renaissance and the Copernican Revolution') » [Odishaw **in** Sullivan, 1961, p. 4].

Le contexte géopolitique tendu des années 1950 appelle pourtant à la prudence. « En public », écrit Susan Hough dans son article sur la « sismologie et l'Année Géophysique

---

[150] Entre le 1er juillet 1957 et le 31 décembre 1958, se déroule l'Année géophysique internationale (AGI, ou 'International geophysical year' (IGY)), que James Wordie, responsable du Comité national britannique pour l'AGI a qualifié de « plus grande entreprise de coopération scientifique menée jusqu'alors ». Initialement pensée, en 1950, comme une troisième Année *polaire* internationale devant succéder à celles de 1882-83 et 1932-33, il avait été finalement décidé dès 1951 d'étendre le programme à l'ensemble des latitudes terrestres. D'une durée de dix-huit mois (afin de couvrir une année complète d'observations dans les deux hémisphères), l'AGI mobilise des scientifiques de plus de cinquante nationalités. L'objectif annoncé de cette entreprise scientifique est la mesure simultanée « des forces agissant sur notre planète », à l'aide d'un « réseau mondial de stations ». L'envergure du projet prévoit des études dans différents champs scientifiques, dont beaucoup sont reliées à la question de flux radiatifs (l'activité solaire et le rôle de filtre de l'atmosphère font partie des interrogations principales – la date de l'AGI a même été choisie en raison de la prévision d'un pic d'activité des taches solaires en 1957, idéal pour observer des aurores polaires et des phénomènes magnétiques et météorologiques spectaculaires). Les objets et disciplines scientifiques concernés sont multiples : « activité solaire », « rayons cosmiques », « ionosphère », « aurores et lueur de la haute atmosphère », « géomagnétisme », « météorologie », « glaciologie », « longitudes et latitudes », « océanographie », « sismologie ».

Il s'agit de réaliser, outre de vastes mais éphémères campagnes de mesures, l'extension des réseaux d'instruments de mesures existants – de télédétection, pour la plupart – à l'ensemble de la planète. L'objectif premier recherché est d'obtenir des mesures standardisées, ou tout le moins comparables ; l'autre tâche, tout aussi décisive, est de déployer des moyens de communication rapides pour les échanger (l'un des objectifs centraux de la jeune OMM (1950-…), qui participe à l'AGI – voir corps du texte). [*British National Committee for IGY*, 1957, « Foreword by James Wordie » & « Contents » ; Nicolet, 1982, pp. 223-225]

L'AGI précède de plusieurs années les expériences comparables des sciences de la biologie environnementale – le premier programme comparable à l'AGI (bien que « plus modeste, et sans grand succès », modère D. Doel) étant l'"International Biological Program' de 1964-67 [Doel, 2009, p. 158].

Internationale », les défenseurs de l'AGI comme les politiciens promeuvent invariablement l'AGI « comme participant de quelque dynamique internationaliste et pacifiste. » Ainsi, dans une lettre de 1954 adressée au Dr. Chester Barnard, président du 'National Science Board of the National Science Foundation', le Président Dwight D. Eisenhower écrit :

> « [Le projet AGI] est un exemple frappant d'opportunités qui existent dans l'action coopérative entre les peuples du monde. » Avant d'ajouter que, « sous des conditions particulièrement favorables, des scientifiques de multiples nations allaient pouvoir travailler à l'extension du savoir humain sur l'univers. » [Eisenhower, 1954 **in** Hough, 2008]

« De semblables sentiments nobles infiltrent toute la rhétorique publique concernant l'AGI », constate ironiquement S. Hough… Pourtant, force est de constater que l'implication de l'URSS dans l'AGI ne fut pas à la hauteur de sa puissance technologique, ni de sa riche tradition de géophysiciens.[151] L'initiative primitive de l'AGI en 1950 était venue d'Occidentaux (Européens de l'ouest et Etats-Uniens). Une grande méfiance régnait entre les deux Blocs, dans la mesure où les élites politico-militaires états-uniennes comme soviétiques associaient avant toute chose la géophysique à la connaissance et à la conquête de *territoires stratégiques* (espace, océans, sous-sols et déserts – déserts polaires, en particulier) et/ou à la *surveillance de l'ennemi* (lieu et magnitude des essais nucléaires, localisation des armes, *etc.*). Comme l'a résumé R. Doel, « l'AGI ne fut pas la remarquable exception aux hostilités que beaucoup de commentateurs de l'époque avaient voulu voir, mais était intimement connecté à des objectifs de sécurité nationale aux yeux des nations dominantes impliquées. C'était particulièrement le cas aux Etats-Unis. » [Hough, 2008 ; Doel, 2003, p. 647][152]

---

[151] Quant à la Chine communiste, qui est alors reconnue diplomatiquement par un faible nombre de pays (elle ne sera pas reconnue par les Etats-Unis avant 1979), elle ne participa pas à l'AGI [Nicolet, 1982, p. 230]. Les astronomes états-uniens ne parvinrent pas même à obtenir de visa pour leurs homologues de Chine (ni d'autres pays non reconnus comme Etat par la Maison blanche), afin qu'ils assistassent à la Rencontre de l'"International Astronomical Union' de 1961, qui se tint à Berkeley [Doel, 2003, p. 648].

[152] Si le financement de l'AGI se devait d'être présenté comme une œuvre caritative et aux visées pacificatrices auprès des médias, l'argument stratégique était utilisé pour promouvoir l'AGI au cours de conférences à l'attention des décideurs politiques et des militaires. La communication de Lloyd Berkner, afin de promouvoir les recherches antarctiques de l'AGI auprès des décideurs, en témoigne :

> "In ["circles" where they did not have to use "public rhetoric"], proponents of the IGY spoke of science that served national strategic interests. During 1956-1957, Berkner hit the lecture circuit, delivering more than 50 talks on the IGY to a diverse range of audiences. Among his speaking venues were some that testify to the strategic nature of the IGY: the Armed Forces Industrial College, Brookhaven National Laboratory, and the National War College. Talks and papers related to strategic issues were classified, but it is not difficult to read between the lines. Melvin Conant, director of meetings for the Council on Foreign Relations wrote Berkner to thank him for his "comments relating to the strategic importance of the area and the importance of greater knowledge of Antarctica to the general hypothesis regarding the earth" (Conant 1959). The strategic importance of Antarctica stemmed largely from territorial claims, past and future. But with the advent of submarine warfare and a geopolitical situation in which the Arctic represented the closest route between the United States and its primary political adversary, the military found itself with a newfound interest in the quantification of ice-sheet properties. The advent of nuclear submarines in the early 1950s contributed to this interest, because nuclear submarines potentially could play hide-and-seek games indefinitely beneath a cover of ice."

Etudions les "territoires stratégiques" l'un après l'autre – qui, ce n'est pas un hasard !, sont tous les quatre des lieux jugées désertiques (ou presque). Prenons, tout d'abord, l'exemple aéronautique et spatial. Les officiels et scientifiques russes s'opposèrent fermement aux survols près des frontières de l'URSS, et se montrèrent réticents à communiquer sur tout ce qui toucherait à leurs programmes nationaux aérospatiaux et satellitaires… Tant et si bien que, alors que le Comité Spécial de l'Année Géophysique Internationale (usuellement désigné par son acronyme en français : CSAGI) avait reçu une lettre de l'Académie des sciences états-unienne dès le 29 juillet 1955, donnant son aval pour le lancement d'un satellite dans le cadre de l'AGI, le Comité de l'AGI de l'URSS – certes contacté plus tardivement que les Etats-Unis – lui annonça son intention de lancer un satellite scientifique seulement en septembre 1956. Puis, les Soviétiques ne communiquèrent guère jusqu'au lancement effectif de Spoutnik-1, en octobre 1957… le mois-même où se tenait à Washington une réunion du groupe « fusée et satellites » de l'AGI. Suivit le lancement de Spoutnik-2 (six fois plus lourd que Spoutnik-1), le 3 novembre 1957. Les Etats-Unis répondront le 31 janvier 1958, avec la mise sur orbite de leur premier satellite Explorer 1 – toujours au cours de l'AGI, donc. Car, le Sénateur Lyndon B. Johnson n'était pas le seul Américain à penser que les maîtres de l'espace – « les maîtres de l'infini » – deviendraient les maîtres du monde (en observant, et même en modifiant le temps et le climat) [Johnson, 1958, "Text of Johnson's Statement on Status of Nation's Defenses and Race for Space", *New York Times*, January 8, 1958, 10 **in** Howe, 2010, p. 44]… Deuxième exemple : certains des programmes de *sismologie* de l'AGI ne pouvaient cacher leurs applications pour la surveillance militaire (détecter les essais nucléaires ennemis).[153] Troisième exemple : les zones polaires, très convoitées par les

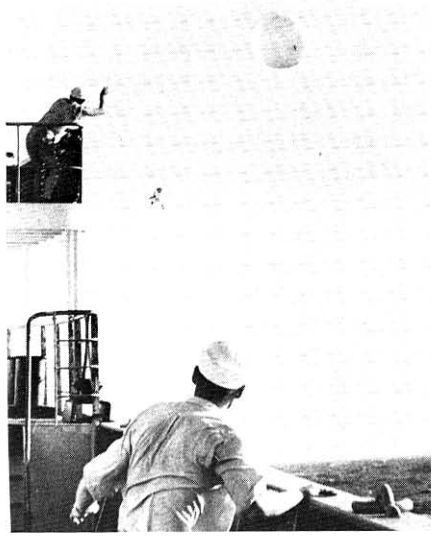
---

On ne s'étonne pas de voir Berkner jouer ce rôle. Après avoir acquis de l'expérience dans la recherche ionosphérique et le développement de systèmes de radars à la Navy, il était devenu secrétaire de direction de l'"U.S. Research and Development Board', chargée du développement et de la coordination du programme militaire de recherche et développement. « Dans un rapport très complet adressé au Département d'Etat daté de 1950 (dit « rapport Berkner ») qui eut une grande influence, l'astrophysicien avait décrit les possibilités d'une « symbiose entre science et intérêts stratégiques » de l'Etat américain. » [Hough, 2008] (Nous reviendrons sur le cas L. Berkner à la fin de la Section (dans le corps du texte), pour "l'opposer à S. Chapman et M. Nicolet".)

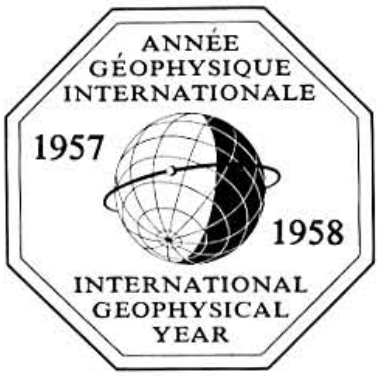
[153] D'après S. Hough, le programme sismologique de l'AGI se résuma presque au seul programme états-uniens :

> "From the start the IGY led a double life. Although Chapman had identified the expected sunspot peak as the impetus for organizing an IPY [(International Polar Year, finally named International Geophysical Year) in 1957-58], the 1950s were, of course, enormously charged political times. Many historians point to 29 August 1949 as the start of the nuclear arms race: On this date, the Soviet Union carried out its first nuclear weapons test explosion, "First Lightning". […] The genesis of the IGY seismology program was [hence] influenced significantly both by developments in the field of seismology and burgeoning national strategic interests."
>
> "From the start, seismologists knew about the nuclear tests. The military could try to keep them secret, but the seismic waves they generated did not respect government classifications. Ground as well as air waves from even the above-ground Trinity explosion in New Mexico announced themselves clearly on seismographs in southern California (*e.g.,* Gutenberg 1946). In turn, the U.S. government was aware that its tests would be recorded by seismometers in California, too. Thus the symbiotic relationship between seismology and political/military interests dates back to the immediate aftermath of World War II. In the late 1940s the United States established a top-secret nuclear explosion detection system that focused on sampling airborne radioactive particles but also included monitoring seismic waves from nuclear explosions (Ziegler and Jacobson

concepteurs de l'AGI, revêtaient un caractère géostratégique double. D'abord, en matière de revendication territoriale sur le continent antarctique. Ensuite, parce que les propriétés de la couche de glace des pôles devenaient des enjeux de recherche pour la navigation (en particulier, l'Arctique était la route la plus courte entre les Etats-Unis et l'URSS). Quatrième exemple : les océans étaient à présent sondés par de multiples sonars, et les instruments embarqués à bord des bateaux inspectaient les mers comme le ciel. La Figure 18 (a) ci-dessous donne ainsi l'exemple de mesures faites par radiosonde à bord d'un bateau finnois sillonnant l'océan atlantique, alors que le Figure 19 (b) montre le logo de l'AGI, qui atteste l'importance des programmes satellitaires et antarctiques. [Hough, 2008 ; Nicolet, 1982, p. 228 ; Merle, 2008, http://www.clubdesargonautes.org/histoirestem/agi.php (05/09/2014); Howe, 2010, pp. 32-33 ; Doel, 2003, pp. 647-648 ; Doel, 2009, pp. 147-151]



(a)



(b)

Figure 18 : (a) Préparatifs en vue d'ascensions d'une radiosonde arrimée à un bateau finnois, qui fera régulièrement la navette entre Helsinki et Rio de Janeiro au cours de l'AGI ; (b) logo de l'AGI, qui met en avant le rôle central que devaient y jouer les satellites artificiels et l'étude de l'Antarctique [Nicolet, 1982, « Figures n°11 (Photo : Finnish Meteorological Institute) et n° 10 », planche faisant face à la page 224]

Les historiens ont donné de nombreux exemples de l'importance diplomatique des artistes (que l'on pense par exemple aux "missions" de D. Chostakovitch aux Etats-Unis et dans les pays du Bloc de l'est), mais également des scientifiques, et en particulier de l'atmosphère et des géophysiciens, à la géopolitique au cours des deux premières décennies de la Guerre froide. Même s'il faut reconnaître que de nombreuses contributions demeurent couvertes du voile du secret ou dorment encore dans les archives, R. Doel et ses collègues ont déjà su montrer « le rôle critique » qu'ont joué des géophysiciens dans les affaires

1995; see also Barth 2003) [… The] seismological programme of IGY [, it] ended up being almost reduced to a contribution by the US". [Hough, 2008]

étrangères des Etats-Unis à cette époque. D'abord, parce qu'ils étaient des acteurs décisifs dans les expertises sur des régions géographiques stratégiques telles que l'Arctique et l'Antarctique. Ensuite, parce que les officiels du Pentagone percevaient les (géo)physiciens comme des contributeurs vitaux à la R&D des armes, et à la surveillance de la R&D de l'ennemi.

Enfin, parce que, de par la nature même de leurs objets – *globaux* –, les géophysiciens avaient développé des institutions internationales pérennes à la fin du XIX^{ème} siècle et au début du XX^{ème} siècle, au sein desquelles les coopérations entre scientifiques des deux Blocs redevenaient possibles une fois l'armistice de la Seconde guerre mondiale signé [Nicolet, 1982, pp. 222-223]. « De praticiens de la science globale, les géophysiciens [et les océanographes] devinrent rapidement des acteurs qui contribuèrent à déterminer la politique globale » de l'après-guerre, conclut R. Doel. En témoignent tout particulièrement l'importance de leurs expertises et leur implication auprès des élites politiques dans la tenue de premières conférences internationales sur l'environnement à grande échelle et de premières signatures de traités multilatéraux : la première Conférence des Nations unies sur le droit de la mer en 1958 ; le Traité sur l'Antarctique en 1960 ; Le Traité d'interdiction partielle des essais nucléaires de 1963 ; *etc.* Et, donc, la mise en œuvre de l'AGI. [Doel, 2003, p. 646 & 648-649]

On ne saurait toutefois consacrer l'expression de l'historien Michael Dennis, qui écrivait en 1999 que l'AGI était peut-être « simplement une entreprise de contrôle des armes par d'autres moyens » que les programmes militaires secrets de surveillance [Dennis, 1999, p. 16]. Aux yeux de nombreux scientifiques, l'AGI devait, au contraire, privilégier des programmes scientifiques étrangers aux enjeux politiques immédiats, en rupture donc avec le tropisme de la plupart des travaux de l'époque des atmosphériciens, des géophysiciens et des astronomes. C'était sans doute le souhait le plus cher de la plupart de ses créateurs en 1950 (Sydney Chapman, James Van Allen, Lloyd Berkner, Wallace Joyce, Ernest Vestine, Fred Singer, *etc.*)[154] – nous reviendrons sur les cas Chapman et Berkner. C'était également

[154] Hough écrit :

> "The IGY involved an ambitious program to coordinate the collection of geophysical data from all corners of the globe. This far-reaching enterprise had humble beginnings: It was conceived over chocolate cake at a dinner party hosted by the pioneering astrophysicist James Van Allen and his wife, Abigail, at their home in Silver Spring, Maryland, on the night of 5 April 1950 (Sullivan W., 1961). Guests included Sydney Chapman, Lloyd Berkner, J. Wallace Joyce, Ernest Vestine, and S. Fred Singer. According to Van Allen, Chapman and Berkner first formulated the idea of holding an International Polar Year in 1957–1958. Two previous International Polar Years had been held, in 1882 and 1932. […]
>
> "Van Allen and his guests, principally Chapman and Berkner, brought their ideas to several key meetings, including a July 1950 conference on the Physics of the Ionosphere (Bullis Harold, 1973, *Science, Technology, and American Diplomacy: The Political Legacy of the International Geophysical Year*). The proposal made its way to the International Council of Scientific Unions. It soon grew into a proposal for a larger effort rather than one

l'occasion de coopérer avec les chercheurs du Bloc de l'est avec l'aval des élites politiques. On parvint même à intégrer un éminent sismologue et spécialiste de la croûte océanique russe, Vladimir Vladimirovich E. Beloussov (1907-90), Directeur du Département de Géodynamique de l'Institut de Physique de la Terre à Moscou, au sein du Comité Spécial de l'Année Géophysique Internationale (CSAGI) (voir Figure 19 ci-dessous).

Figure 19 : Composition du CSAGI en 1958. De gauche à droite, les Docteurs V.V. Beloussov, L.V. Berkner, M. Nicolet (Secrétaire général), J. Coulomb et S. Chapman (Président). La première session plénière du Comité CSAGI se déroula entre les 30 juin et 3 juillet 1953 à Bruxelles, et les rencontres finalisant les programmes de l'AGI se tinrent à Rome (1954), Bruxelles (1955) et Barcelone (1956).
[Nicolet, 1982, Photographie prise dans les quartiers généraux du CSAGI à Bruxelles en février 1958, « Figure n°3 », planche faisant face à la page 224]

Tout d'abord, l'AGI fut étrangère aux enjeux, éminemment géopolitiques, des impacts environnementaux humains transnationaux et globaux. Avant les alertes au changement climatique ou à la destruction de l'ozone stratosphérique, la Terre globale est définie presque exclusivement par des mécanismes aux très longues temporalités. La Terre globale ne s'est pas même encore incarnée dans les images prises depuis l'espace que diffuseront la NASA à la fin des années 1960, et qui susciteront dans un large public un sentiment de fragilité de la planète, et un sentiment d'appartenance à une communauté du vivant partageant une même destinée. Ensuite, les géophysiciens à l'origine du projet AGI, et plus généralement les scientifiques qui contribuèrent au projet, vécurent l'AGI comme une échappatoire à une recherche scientifique trop finalisée, dans laquelle les contrats belligérants l'avaient confinée depuis 1940. Les penseurs de l'AGI souhaitaient avant toute chose diversifier la recherche géophysique, en pointant du doigt des problématiques qui avaient souvent été soulevées grâce aux sciences et technologies militaires, mais délaissées faute d'intérêt pour la défense nationale et/ou pour la course à l'hégémonie spatiale.

focused entirely on polar observations. By October of 1952 the IPY [International Polar Year] had evolved into the IGY. In 1952 the International Council of Scientific Unions set up a special IGY committee, the 'Comité Spécial de l'Année Géophysique Internationale', more commonly known as CSAGI. Sydney Chapman was appointed president of the committee (Bullis 1973)." [Hough, 2008]

Enfin, grisés par les études multiples des années 1940-1950, qui avaient soulevé de nombreuses questions nouvelles, les géophysiciens étaient plus que jamais en demande de réseaux de mesure à l'échelle globale. Ils avaient certes une longue expérience de la constitution de tels dispositifs, dont les Années polaires internationales de 1882-83 et 1932-33. Mais, la seconde année polaire, précisément les avait laissés sur leur faim (la crise économique des années 1930 avait réduit les budgets, et avec eux le nombre de pays impliqués, se rappellerait M. Nicolet). En particulier, l'exploration de la troisième dimension atmosphérique (l'altitude) avait alors – et jusqu'alors – été faible. L'extension des observations météorologiques par l'utilisation de radiosondes, l'expansion de la recherche ionosphérique à l'aide de sondes ionosphériques et des lancements de roquettes en grand nombre furent préconisés [Nicolet, 1982, pp. 223-224].

Le caractère principalement "apolitique" du programme *sur l'ozone* de l'AGI – autre problématique d'exploration de la troisième dimension atmosphérique – est, en tout cas, manifeste. Il n'en est pas moins ambitieux. En préparation de l'AGI, le nombre de spectrophotomètres au sol passe d'une dizaine à trente-deux (parmi les stations qui avaient plus de trois années d'observations effectuées à l'aide du spectrophotomètre Dobson standard). Puis, il atteint plus de cinquante instruments à la fin de l'année 1958.[155] Dans la continuité de l'AGI, le nombre s'élèvera à cinquante spectromètres au moment de l''International Quiet Sun year' (IQSy ; 1964-65), et à une centaine à la fin des années 1960 (soit le même nombre environ qu'aujourd'hui).

Le programme sur l'ozone de l'AGI a, de toute évidence, été tributaire des intérêts scientifiques particuliers des porteurs du projet. Susan Hough a souligné, pour commencer, la *prééminence des projets inhérents aux flux radiatifs et à la haute atmosphère* sur la feuille de route de l'AGI, en particulier dans son projet initial. Les missions scientifiques proposées reflétaient les préférences des chercheurs à l'origine du projet AGI, dont le noyau dur s'était réuni chez James van Allen dans la nuit du 5 avril 1950, autour d'un dîner festif se refermant sur un gâteau au chocolat (comme le rapportera Walter Sullivan dans son ouvrage *Assault on the Unknown: The International Geophysical Year* ; Sullivan, 1961). Tous ces scientifiques avaient privilégié l'atmosphère comme prisme à travers lequel regarder la Terre. Lloyd Berkner, par

[155] L'Antarctique, en particulier, bénéficia de nombreux spectromètres Dobson. En Terre Adélie, un "Dobson" fut installé à la station de Dûmont D'Urville lors de l'AGI. Relevons que, du fait des activités scientifiques qu'elle stimulait sur le Continent blanc, l'AGI accéléra en outre la signature d'un traité international sur l'Antarctique (Washington, 1959), qui fit notamment passer officiellement la Terre Adélie, et donc la station de Dûmont D'Urville, sous "souveraineté française". Les Britanniques mirent quant à eux en place la Station de Halley Bay (dès 1956, mais explicitement en vue de l'AGI), où seront réalisées les mesures de Farman et collègues, utilisées pour construire l'alerte au trou de la couche d'ozone antarctique en 1985.

exemple, était reconnu comme le premier à avoir mesuré les dimensions et la densité de l'ionosphère. [Bojkov, 2010, p. 23 ; Dobson, 1968, p. 387 ; Hough, 2008]

Mais surtout, l'un d'entre eux était Sydney Chapman, une figure importante de la science de la moyenne et haute atmosphère, et en particulier de l'ozone. Or, dès les premiers préparatifs de l'AGI, Chapman fut désigné Président du CSAGI. Fort de sa large reconnaissance collégiale dans différentes sous-disciplines de la Géophysique, Chapman assumera un rôle de militance, de planification, de configuration et de 'leadership' de l'AGI.[156] Et, du fait de son cheminement scientifique, Chapman va mettre à profit son 'leadership' pour favoriser l'intégration dans l'AGI d'un programme significatif de mesures d'ozone… alors que, dans le même temps à l'époque, l'IO3C étend très péniblement son réseau de spectromètres standardisés. En 1952, alors que les premiers plans d'organisation de l'AGI prennent forme, S. Chapman nomme l'aéronome et météorologiste belge Marcel Nicolet (1912-1996) secrétaire général du CSAGI (voir Figure 20 (a & b)), qui fera plus que le relayer dans cette tâche d'extension du réseau d'ozone.

---

[156] Au tournant des années 1950, S. Chapman possédait une aura importante dans l'ensemble de la communauté des géophysiciens. Il avait acquis des lettres de noblesse dans de nombreuses sous-disciplines de la géophysique, depuis la fin des années 1920. En témoignent les honneurs dont l'ont couvert ses pairs, dans son pays d'origine comme aux Etats-Unis, où il passait la moitié de l'année, dans les locaux alaskiens de l'"American Geophysical Union'. Dès 1919, Chapman, avait été reconnu 'Fellow of the Royal Society'. Cette dernière lui avait ensuite attribué une Médaille royale en 1934 ; s'ajoutera la Médaille Copley en 1964, distinction la plus ancienne et la plus prestigieuse délivrée par l'institution. Quant à l'"American Geophysical Union', elle lui décernera la Médaille William Bowie en 1962. Chapman était par ailleurs devenu membre étranger de l'Académie des Sciences états-unienne. Au cours des années précédant l'AGI, il avait obtenu la Médaille d'or de la 'Royal Astronomical Society' (1949) puis avait été élu 'Fellow of the Royal Society of Edinburgh' (1953).

Le géophysicien et astronome Hugh Odishaw, directeur exécutif du Comité national états-unien pour l'AGI entre 1954 et 1965, collabora avec Chapman dans les années 1950. Il a souligné de manière lyrique et élogieuse la part de responsabilité de ce dernier dans la réalisation de l'AGI :

> Chapman "was part of the enterprise from its inception on the evening of April 5, 1950, at the home of James Van Allen, when Lloyd V. Berkner suggested a third but more comprehensive Polar Year, and Berkner and he pursued this goal steadfastly until its realization. Chapman shaped that broader notion of the International Geophysical Year, and in some ways his commitment long antedated these events. It could be argued that a sense of history and his own scientific work had long before conditioned and prepared him for the IGY. He was intimately familiar with the Polar Years of 1882-83 and 1932- 33. Thus, in 1926 Chapman used magnetic storm data acquired in the First Polar Year as the basis for his hypothesis on the flow of currents in the upper atmosphere, later developing with Ferraro a theory to explain these current systems. Chapman himself was involved in the planning and conduct of the Second Polar Year, and his papers made use of the data of that program. In 1938, with Vestine, for example, he compared current systems using 1882-83 and 1932-33 data. So Chapman had deep roots in these two antecedents of the IGY, suggesting his sensitivity to history and his awareness of the value of synoptic data, but also attesting to his unflagging personal involvement in research. […]
>
> "The act of presiding over CSAGI is a matter of historical record; the acts of leadership are intangible. They are tied to his own being as scientist and man. Continuously over the years Chapman betrayed with almost every breath his own commitment to the pursuit of knowledge. The excellence and breadth of his own work led to a remarkable rapport with all whom he encountered, whether in private, in a small group, or in an assembly. Put another way, he engendered a scientific confidence in the enterprise by virtue of his own investigations and his own willingness to commit himself fully to the IGY. […]
>
> "Perhaps one last factor merits lightly touching: tenacity. Behind his own prolific and sustained scientific output, underlying his moral tone, and cropping out in his regimen of walking, swimming, and cycling, there lies a Lancashire doggedness and persistence, quiet but fixed, that pushed the IGY enterprise through its years of planning, execution, analysis, and synthesis." [Odishaw, 1968, "the International Geophysical Year" **in** Akasofu, 1968]

(a)

(b)

Figure 20 : Photographies de (a) Sydney Chapman et de (b) Marcel Nicolet vers 1960 [*Imperial College of London's website*, 2010, www3.imperial.ac.uk/icimages?p_imgid=5782 ; Ackerman & Jaumotte, 2011, p. 32]

Mais, avant de décrire le rôle de M. Nicolet (et de l'OMM) dans la multiplication spectaculaire de spectromètres Dobson à ozone dans le cadre de l'AGI, nous mettrons en regard deux types de figures promotrices de cet immense et protéiforme programme scientifique international que fut l'AGI, comme pour compléter le tableau qu'ont commencé à peintre les historiens Allan Needell ou Ronald Doel. Dans son article de 2003 intitulé "Constituting the Postwar Earth Sciences: The Military's Influence on the Environmental Sciences in the USA after 1945", ce dernier a opposé deux collègues géophysiciens, qui avaient commencé ensemble leur carrière en Antarctique sous les ordres de l'Amiral Richard E. Byrd en 1928 (lors d'expéditions précoces vers le Pôle sud), puis avaient joué plus tard un rôle crucial dans l'organisation et la mise en œuvre de l'AGI : Lloyd Berkner, d'une part ; Laurence M. Gould, d'autre part. Pour le premier, qui faisait partie des instigateurs de l'AGI (lors du fameux dîner chez les van Allen le 5 avril 1950), il semblait évident, et même inévitable que l'AGI s'inscrivît dans la logique prévalentes des coopérations scientifiques "hypocrites" entre Etats-Unis et URSS, qui n'étaient souvent qu'une forme de surveillance mutuelle déguisée. Comme l'a écrit A. Needell, Berkner était devenu un « visionnaire technocrate », qui faisait « tampon entre le monde et les idéaux de la science, et les valeurs et besoins de l'Etat américain élargi de la Guerre froide. » En 1950, dans un rapport sur le recherche scientifique qui eut une grande influence auprès des élites décisionnaires (le rapport dit « Berkner », adressé au Département d'Etat, avec en pièce jointe un « supplément secret »), le géophysicien avait décrit les potentialités d'une symbiose entre science et intérêts stratégiques » de l'Etat américain. [Needell, 2000, pp. 3-7 ; Doel, 2003, pp. 646-647 ; Hough, 2008]

A l'inverse, l'ancien collègue de Berkner, le géologue L.M. Gould, incarne aux yeux de R. Doel la figure du « modéré (politiquement) » et du non-ambitieux, que le pouvoir ne grisait pas. Il préféra occuper des postes (certes élevés) dans les Facultés de Carleton puis du Minnesota, plutôt que rejoindre les grands laboratoires de géophysique ; et surtout, à l'inverse de Berkner, son implication au sein du 'President's Science Advisory Committee' (créé en 1958) sera faible (Berkner avait, en outre, créé l''Office of the Science Advisor' au sein du 'Department of State' à la fin des années 1940). L.M. Gould prit la tête du Programme Antarctique de l'AGI, mais avec comme mot d'ordre la coopération internationale avant toute chose. Il écrira plus tard que les programmes de l'Antarctique lors de l'AGI avaient démontré « que la communauté scientifique était l'exemple le plus utile de coopération et d'organisation mondiale » [Doel, 2003, pp. 646-648 ; Gould, 1970 in Doel, 2003, p. 648].

Or, de mêmes sentiments animaient le "pacifiste" S. Chapman (exempté de service militaire au cours de la Première guerre mondiale ; voir Chapitre 1), et son jeune ami et collègue M. Nicolet. En 1982, ce dernier était encore transporté par la ferveur de ses premières années comme ambassadeur de la coopération scientifique internationale dans le contexte de tension géopolitique des années 1950 :

> « L'un des plus précoces résultats tangibles de l'AGI fut la manière avec laquelle elle réunit un nombre important de milliers d'hommes et de femmes venant du monde entier pour se réunir spontanément et librement au sein d'une entente commune ('in a common understanding'). Il s'agissait d'une entreprise qui n'incombait à aucune organisation gouvernementale bien qu'ayant des financements gouvernementaux, qui n'était pas liée à des décisions militaires ('not linked with military dispositions') bien qu'ayant des soutiens logistiques provenant de forces armées de plusieurs pays, qui n'était pas organisée par une institution internationalisée bien que comptant sur la collaboration de scientifiques puisés dans 67 pays. […]
>
> « La structure du CSAGI évolua de telle manière qu'il put opérer efficacement dans des conditions politiques existantes, mais en évitant les goulots d'étranglement bureaucratiques. L'une de mes fonctions de Secrétaire général était de m'occuper de telles difficultés, et de m'assurer que la base scientifique de l'AGI conçue originellement en 1950 puis développée dans chaque champ scientifique n'était jamais perdue de vue. Il était également important que l'enthousiasme des rapporteurs engendrât un enthousiasme semblable au niveau national, afin que les scientifiques à travers le monde devinssent activement impliqués. » [Nicolet, 1982, p. 229 & 228]

On peut certes imaginer que la tenue de campagnes de mesures et, mieux encore, l'installation de stations de mesures dans des pays à faible tradition d'étude géologique, à l'aide de financements venus des pays riches, créa de nouveaux embryons de recherche géologique nationale, voire contribua à la reconnaissance de pays fraîchement créés (que l'on pense au Pakistan (1947), à la Birmanie (1948), à la Tunisie (1956), au Ghana (1957), ou encore à la Malaisie (1957)) [Nicolet, 1982, p. 230]). En outre, la description de l'AGI comme un *fait* pacifique est évidemment erronée ; néanmoins, comme nous le montrons dans la section suivante, la manière dont M. Nicolet mena *quant à lui* sa barque lors des préparatifs de l'AGI montre qu'il était animé d'intentions pacifistes et était d'abord en quête de nouveaux savoirs, de *theoria*.

En d'autres termes, il faut modérer l'assertion de R. Doel qui veut que « les principaux architectes des programmes internationaux à l'intérieur de la communauté des sciences de la Terre fussent ceux dont les carrières ressemblaient le plus à celle de Berkner », c'est-à-dire ceux qui avaient pleine conscience de « l'interconnexion de la géophysique, du secret, de la collecte de données, des services de renseignement et des agendas de recherche », et qui n'hésitaient pas à en jouer pour obtenir des fonds (sur L. Berkner, voir note de bas de page n° 151, *supra*) [Doel, 2003, pp. 647-648]. R. Doel avait déjà donné un contre-exemple pour les Etats-Unis, avec la figure de L.M. Gould. Il en existait donc également en Europe de l'ouest, dont S. Chapman, le « pacifiste » anglais, et M. Nicolet, le jeune aéronome belge qui s'était rapidement fait connaître des deux côtés de l'Atlantique grâce à sa « Contribution à l'étude de l'ionosphère » (sujet de sa thèse d'agrégation à l'Université de Bruxelles en 1945) [Ackerman & Jaumotte, 2011, p. 33]… Même si, comme nous verrons dans le Chapitre 6, il existait bien sûr un marché militaire de la recherche géophysique en Europe occidentale (nous donnerons, pour la France, l'exemple de Jacques Blamont dans les années 1950-70).

L'OMM, nouveau bailleur de fonds des mesures d'ozone. La création du 'Global Ozone Observing System' (GO_3OS) en 1957

On connaît l'importance que S. Chapman a accordée aux questions d'ozone stratosphérique au cours de sa carrière. M. Nicolet est lui aussi un spécialiste de la physico-chimie de la moyenne et de la haute atmosphère. Au moment où se prépare l'AGI, au tournant des années 1950, il vient de publier un article sur l'ozone mésosphérique.[157] C'est donc avec un

[157] Dans les années 1950, la distinction entre moyenne et haute atmosphères est moins marquée qu'à partir de 1970. Les travaux Nicolet sont concentrés sur la moyenne et la haute atmosphère au sens large, ainsi que l'interaction rayonnement solaire - atmosphère dans toute la colonne d'air. La stratosphère fait partie des régions étudiées par Nicolet, même s'il ne publiera, avant 1971, aucun travail spécifique sur la couche d'ozone – qui est, précisons-le, située sans ambigüité dans la stratosphère. [Ackerman & Jaumotte, 2011]

Lorsque Chapman fait appel à lui pour l'organisation de l'AGI, Nicolet vient de cosigner un travail sur l'équilibre photochimique des trois allotropes d'oxygène (O, O_2, O_3) dans la mésosphère, c'est-à-dire la haute atmosphère (*cf.*

intérêt scientifique personnel certain que Nicolet suggère à l'IO3C de se mettre en ordre de marche dès à présent, en vue de l'AGI, opportunité exceptionnelle pour l'IO3C parsemer le globe de ses instruments de mesures d'ozone avec la plus vaste extension possible.

Les premières discussions publiques sur l'AGI, en 1950, se tinrent dans le cadre de conférences de l'ICSU. Mais, la même année, les Nations Unies avaient créées l'Organisation météorologique mondiale (OMM ; en anglais, 'World Meteorological Organization', WMO), qui succédait à l'Organisation météorologique internationale (ou IMO, 'International Meteorological Organization' ; 1878-1950). L'ICSU chercha immédiatement à impliquer l'OMM dans le projet. Le Comité exécutif de l'OMM accepta immédiatement. Certes, aucun des quinze membres dudit comité ne fût un spécialiste de l'ozone ; mais, l'OMM comptait déjà parmi ses quelques membres primitifs A.H. Nagle, de l'US Weather Bureau, chargé à l'OMM de la commission de « météorologie aéronautique », ainsi que Jacques Van Mieghem (1905-80), chargé à l'OMM de la commission d'« aérologie »… et accessoirement membre de l''Institut Royal Météorologique' de Belgique, dont M. Nicolet était membre depuis 1935. [Nicolet, 1982, p. 223 ; *United Nations*, 1951, pp. 956-957 ; Ackerman & Jaumotte, 2011, p. 31]

La préparation du programme de l'AGI, se remémorera M. Nicolet, fut « un processus long et douloureux », devant coordonner les différentes unions de l'ICSU et leurs diverses associations et commissions, les comités nationaux de l'AGI, et, enfin, la jeune organisation météorologique OMM, pour laquelle l'ozone et la stratosphère n'étaient pas des enjeux majeurs. Mais, Nicolet a pu compter sur ses soutiens, dont la Commission pour l'aérologie de l'OMM, qui insiste auprès de son Comité exécutif sur le fait que, s'il fallait prendre part à l'AGI, la priorité devait être donnée à des programmes que seule une coopération internationale était capable de mener à bien. Mieghem pense alors peut-être au programme satellitaire, mais aussi à un programme international de mesures simultanées et mondiales sur l'ozone (alors que les instruments Dobson ont été disposés jusqu'alors dans une dizaine de pays tout au plus). En 1953, Nicolet se rend au siège de l'OMM à Genève, où il insiste vraisemblablement la vision de l'AGI du CSAGI : concentrer les efforts sur des sujets qui aideraient à déterminer les variations de phénomènes « à l'échelle globale », « en fonction des variations de l'activité solaire »… la stratosphère et la haute atmosphère devenant des sujets tout désignés. Le Secrétaire général du CSAGI convainc en tout cas le Comité exécutif de l'OMM d'officialiser la participation de l'OMM à l'AGI (ce qu'il fait en octobre 1953). L'OMM co-organisera donc l'AGI aux côtés de l'ICSU. C'est « pour une part importante

Bates & Nicolet, 1950, *J. Geophys.*, n° 55, p. 301). Des observations de l'ozone au moyen de spectromètres embarqués à bord de fusées V2 par le 'Naval Research Laboratory' de Washington venaient de montrer un déficit d'ozone mésosphérique par rapport à la théorie élaborée par Chapman en 1930. C'est seulement dix ans plus tard que Crutzen transposera leurs équations pour la stratosphère. [Ackerman & Jaumotte, 2011, p. 34]

grâce à l'active participation de l'OMM, affirmera Nicolet, que l'AGI s'est avérée être un creuset ('melting-pot') duquel avait émergé des caractéristiques typiques de la recherche géophysique future » – un plus grand internationalisme et une plus grande interdisciplinarité. [Nicolet, 1982, pp. 224-225 & 231 ; *United Nations*, 1951, pp. 951-954]

Pour commencer, l'OMM s'engage à « faire usage de son influence auprès des services météorologiques nationaux » pour organiser les mesures d'ozone et les calibrations d'après des procédures uniformes, pendant que l'IO3C prodiguera les conseils méthodologiques. Les services météorologiques nationaux sont en effet les seuls centres de mesures atmosphériques que l'on peut trouver dans un grand nombre de pays à travers le monde (un plus grand nombre de pays, en tout cas, que ceux possédant des observatoires astronomiques). L'accord entre IO3C et OMM est entériné en 1957 et, affirme Rumen Bojkov dans son histoire de l'IO3C, a depuis toujours été reconduit avec succès.[158] [Bojkov, 2010, pp. 9, 14, 22-36]

En sus de son action mobilisatrice auprès des services météorologiques nationaux, qui fera grimper à trente-deux le nombre de stations de mesures d'ozone à la veille de l'AGI, l'OMM se charge désormais de collecter et de publier les données, ainsi que d'organiser des exercices réguliers d'intercomparaison entre ces mesures. Dès 1956, Mieghem dirige un rapport de synthèse générale du programme « météorologique » de l'AGI (*Bulletin WMO n° 55*), où s'adjoignent aux observations habituelles sur la météorologie synoptique et dynamique, des détails sur les mesures de radiation solaire et d'ozone atmosphérique » [Nicolet, 1982, p. 227]. Les contributions de ce type n'allaient pas être de trop dans les années suivantes, la décennie de mesures d'ozone débutant par l'AGI allant créer plus de doutes que de certitudes, à la fois au sujet de la théorie photochimique de la stratosphère, et sur le plan de la pertinence des mesures et de l'homogénéité des procédures et technologies utilisées.

Enfin, peu après avoir été appelée au secours de la communauté de l'ozone, l'OMM endosse le rôle de principal bailleur de fonds des mesures d'ozone. Tout d'abord, les fonds onusiens de l'OMM (et de l'UNESCO)[159] permettent au Président de l'IO3C G. Dobson de

[158] En 2010, Rumen Bojkov, secrétaire de l'IO3C entre 1984 et 2004, soulignait l'apport important de l'OMM cinquante ans plus tôt. D'après Ohring et ses collègues, le partenariat toujours renouvelé entre l'onusienne OMM et l'ONG ICSU (dont l'IAMAS, dont l'IO3C) était rapidement devenu « naturel » : « l'IAMAS, via ses commissions, fournit des orientations scientifiques, et l'OMM, qui regroupe tous les gouvernements du monde et leurs services météorologiques, facilite la mise en œuvre des programmes d'observation globale ». Les tâches de l'IO3C avaient en effet été *principalement* redirigées vers l'organisation de symposiums et la stimulation des études sur l'ozone à l'intérieur de la communauté scientifique. [Bojkov, 2010, pp. 22-36, 11 ; Ohring *et al.*, 2009, p. 1671]

[159] L'UNESCO fut, en outre, l'un des principaux bailleurs de fonds de l'AGI, avec 100 000$ US, qui rendirent possible l'établissement d'un secrétariat permanent de l'AGI à Bruxelles en 1953 (par ailleurs, le CSAGI reçut 200 000$ US de plusieurs comités participants à l'AGI). [Nicolet, 1982, p. 226]

nommer un physicien-voyageur à temps partiel, C.D. Walshaw, avec pour mission d'inspecter et d'améliorer les instruments de la plupart des stations européennes, avant et pendant l'AGI (oct. 1955-juillet 1957). Puis, après l'AGI, le transfert de responsabilité des stations d'observations routinières depuis l'IO3C vers l'OMM s'accélère. Il revient certes toujours aux laboratoires d'acheter et de mettre au point leurs appareils, voire même à l'IO3C elle-même (qui possédait en propre cinq spectrophotomètres Dobson en 1953). Mais, les supports de l'OMM couvrent désormais presque l'ensemble des frais importants nécessaires à l'extension de la collaboration internationale sur l'ozone et à la circulation de données commensurables (moyens de communication, missions des scientifiques, *etc.*). [Bojkov, 2010, pp. 26 & 11]

En définitive, l'autorité et la militance du Président du CSAGI de l'AGI, S. Chapman, du Président de l'IO3C, G. Dobson, et du Secrétaire général du CSAGI, M. Nicolet, ont permis de soulever des fonds afin d'initier un premier programme de mesures coordonnés d'observations d'ozone à l'échelle globale lors de l'AGI. Ceci a notamment été rendu possible par le soutien financier et logistique de la jeune OMM, qui avait intégré rapidement parmi ses objectifs les mesures d'ozone, en tant qu'elles constituaient des « observations géophysiques en lien avec la météorologie ». En outre, la jeune institution onusienne trouvait dans les programmes sur l'ozone, non seulement des enjeux météorologiques intéressants, mais également une optique de coopération multilatérale, non belligérante, qui collait avec le programme pacifique de l'ONU. En 1957, l'extension et la standardisation du réseau mondial de mesures d'ozone tombe sous la responsabilité de l'OMM. Il est baptisé 'Global Ozone Observing System' (GO3OS ; 1957-1989). [Edwards, 2010, pp. 201-202 ; *OMM*, 1953 **in** *OMM, 2012*, "Purposes of the OMM" in 1953]

Les ozonomètres soviétiques sur la route du « globalisme infrastructurel » promu par l'OMM

Clark Miller et Paul Edwards ont montré comment, comme la plupart des institutions onusiennes créées après la guerre, l'OMM avait dû conquérir sa légitimité. Au cours de la décennie 1950, les budgets de l'OMM demeuraient faibles. De plus, l'OMM peinait à imposer son autorité centralisatrice, au sens où elle dépendait très fortement du bon vouloir d'initiative et de coopération des services météorologiques nationaux. Il lui fallut par conséquent s'impliquer, d'abord, dans des projets de collaboration se targuant d'incarner l'ethos (mertonien) d'« internationalisme scientifique » (comme l'AGI). Ensuite, il fallut chercher des programmes pour lesquels existaient des convergences d'intérêts dans le

contexte de la nouvelle mondialisation (ou « globalisation ») d'après-guerre (par exemple, des travaux météorologiques communs – dont satellitaires – en vue de sécuriser les voyages aériens civils et le transport marine transcontinental).

Enfin, l'OMM (comme le CSAGI) stimula les parties des programmes aptes à intégrer les anciens pays coloniaux, et des pays en voie de décolonisation (en effet, le droit d'adhésion à l'OMM était en principe limité aux « états souverains » reconnus par l'ONU, mais avait été étendu aux colonies et protectorats parrainés par leurs métropoles). En outre, les salles de conférence de l'OMM et leurs couloirs devinrent les caisses de résonance des suspicions et des bonnes intentions des deux Blocs. Ainsi, le GARP ('Global Atmospheric Research Program' ; OMM/ICSU), qui sera promu en 1961 par Jule Charney puis créé en 1967, se plaçait-il sous l'égide du discours de J.F. Kennedy de 1961 sur les utilisations pacifiques de l'espace et de la météorologie. Mais, au cours du Sixième congrès de l'OMM, en 1971, le délégué de Cuba Rodriguez Ramirez ne dénonçait-il pas « l'hypocrisie de l'OMM », qui excluait des « pays socialistes » d'un statut d'adhérant plein et effectif, et laissait les Etats-Uniens détruire au Vietnam « la moitié des stations météorologistes » et confisquer « les vies de plus de cent scientifiques et travailleurs dans le secteur de la météorologie », *etc…* bafouant par conséquent les accords de l'ONU qui voulaient que le 'World Weather Watch' (WWW ; dont nous avons vu qu'il avait été initié dans les années 1950, stimulé par l'AGI, puis officialisé comme organe de l'OMM en 1967) fût un programme pacifique ? [Edwards, 2010, pp. 194-196 ; Ramirez, 1971 **in** Edwards, 2010, p. 196][160]

[160] Paul Edwards a donné plusieurs exemples de convergence ou conflit entre les intérêts des programmes scientifiques de l'OMM et les besoins géostratégiques des Etats. Convergence ou conflits qui rimaient toujours, comme nous l'avons dit, soit avec démonstration de transparence / de fermeté, soit avec intention de reconnaître le droit à exister de pays récemment décolonisés (ou de l'Etat d'Israël) :

> The WMO's "budget grew rapidly in its first two decades. Annual spending increased from about $300,000 in the early 1950s to about $1.3 million by 1965. […] By 1968, its annual budget had reached nearly $4 million. On a symbolic level, the increasingly substantial presence of a central organization mattered enormously. The WMO's most significant work as an institution took place through its technical assistance program. At the time of the First WMO Congress (1951), the impending independence of Libya, then an Italian colony, created the possibility of a break in meteorological operations, since the existing weather service in Libya was staffed mainly by non-Libyan personnel. The Congress directed the Executive Committee to propose a plan for continuation of service and "to express the willingness of the WMO to provide all possible technical assistance within its available resources." From modest beginnings—$23,000 contributed to four countries in 1952— the Voluntary Assistance Program soon became one of the WMO's most significant activities. Accelerating after 1955, decolonization created some 40 new nations, multiplying the problem posed by Libya." ("The WMO [had first] hoped to rely entirely on the UNDP [United Nations Expanded Program of Technical Assistance for the Economic Development of Under-Developed Countries] for funds, but the UNDP's shifting priorities made it an unreliable ally. Therefore, the WMO established its own Voluntary Assistance Program.")
>
> "The WMO perceived these activities as purely technical. But as Clark Miller has shown, they also contributed to a new politics of expertise. Recipients, particularly those engaged in building new "sovereign states," often understood technical assistance activities as elements of a larger political program. For example, by allowing Israel to provide expert advice to its (mostly immigrant) citizens, WMO assistance to the Israeli weather service simultaneously promoted the legitimacy of the new state. Such initiatives both spurred and grew from a new version of scientific internationalism, which Miller describes as "the idea that cooperation

La coopération internationale autour des mesures d'ozone ne semble pas avoir soulevé de controverse diplomatique majeure. En revanche, des écueils se dressèrent bel et bien au cours des préparatifs du programme sur l'ozone de l'AGI ; au premier rang desquels, la coopération entre Occidentaux, qui s'appuyaient principalement sur des spectromètres Dobson, et les Soviétiques, qui avaient développé leur propre instrument spectrométrique. En effet, malgré le medium onusien de l'OMM, le programme sur l'ozone de l'AGI demeurera porté par les Occidentaux – et même, pour la plupart, par les États-Uniens et des Anglais, principaux ennemis de l'URSS. [Bojkov, 2010, p. 7]

Pour commencer, Staline a certes laissé l'URSS continuer sa collaboration au sein de l'Union astronomique internationale (1919-… ; en anglais, 'International Astronomical Union', IAU), et a adhéré immédiatement à l'OMM [*United Nations*, 1951, p. 956] ; en revanche, signe qu'il se méfie de certains aspects de la coopération scientifique internationale, il s'est entêté à ne pas affilier son pays à l'ICSU. Quelques mois après la mort de Joseph Staline, advenue le 5 mars 1953, le Comité national états-unien pour l'AGI se risque à envoyer une invitation aux Soviétiques, auxquels ils proposent de participer activement à l'élaboration de l'AGI. Ceux-ci y répondent favorablement dix-huit mois plus tard. Soucieux de faire étalage de son arsenal technologique, l'URSS offrira de mettre à disposition un tiers des bateaux qui seraient utilisés pour l'AGI, et trois stations sismologiques permanentes dans l'Arctique pour étudier la cryosphère. La contribution des Soviétiques à l'AGI n'en fut pas moins limitée, notamment sur le plan de l'échange des données avec l'Ouest. Les réticences que montrèrent les Soviétiques à communiquer sur leurs programmes de recherches sur les fusées et sur ses satellites peuvent aisément s'expliquer par l'importance militaire de telles technologies. Mais, *comment expliquer leur faible participation au programme sur l'ozone de l'AGI ?* [Howe, 2010, pp. 32-33]

Certes, les possibilités de circulation des scientifiques depuis ou vers l'URSS sont alors réduites. Mais, on trouve par exemple un nombre important de Russes à la 'Radiation Commission' de l'ICSU/OMM de 1959 [Howe, 2010, pp. 32-33 ; Ohring *et al.*,

among governments in the areas of science, technology, and other forms of expertise contributes in important ways to the furtherance of broader goals of international peace and prosperity." (C. Miller, 2001, "Scientific Internationalism in American Foreign Policy" & "Hybrid Management: Boundary Organizations, Science Policy, and Environmental Governance in the Climate Regime," *Science, Technology & Human Values,* 26, no. 4 (2001): 478–500) [… As John Krige would write when] analyzing the 1950s Atoms for Peace Program […]: "When the science concerned is also an affair of state, of immense importance for national strategic interests, international exchange is at once a window and a probe, an ideology of transparency and, by virtue of that, an instrument of control, a viewpoint which looks in and watches over. . . . International scientific exchange deftly reconciled the universalistic appeal to the pursuit of truth with the particularist needs of national security." (J. Krige, "Atoms for Peace, Scientific Internationalism, and Scientific Intelligence," Osiris 21, special issue on Science, Technology, and International Affairs: Historical Perspectives (2006), 171, 181) [Edwards, 2010, Section: "The World Meteorological Organization: Infrastructural Globalism during the Cold War", pp. 193-202 & "Note 29 to Chapter 8", p. 472]

2009, pp. 1679-1680]. Par contre, il est manifeste que les télécommunications sont plus limitées entre Etats-Uniens et Soviétiques qu'entre Etats-Uniens et Britanniques, ou même Etats-Uniens et Belges, ou Italiens, ou Suédois, ou Français… Mais, le principal frein à la collaboration sur les mesures d'ozone de l'AGI, arguons-nous, provint de *la différence d'instruments développés*. Alors que l'on avait perpétué à l'Ouest la tradition dobsonienne des spectromètres à prisme, les spectromètres soviétiques utilisaient la technique de *filtres d'interférence*, les M-83 (puis, les M-124 à partir de 1986).[161] Néanmoins, le territoire soviétique couvrait plus de quatre pourcent du globe ; aussi, une coopération avec l'URSS était presque indispensable à un réseau de mesures globales d'ozone, ne serait-ce que sur un plan strictement scientifique. En définitive, sur la centaine de stations ozonométriques mises en opération lors de l'AGI sur l'ensemble des continents, neuf stations furent montées en Union soviétique en 1957 pour mesurer la colonne d'ozone et les distributions verticales de l'ozone les surplombant. Six stations parmi elles furent incluses dans le système d'échange international de données ozonométriques. [Mégie *et al.*, 1989 ; Bezverkhniy *et al.*, 1960]

Or, *le travail de standardisation ne fut pas suffisamment encouragé dans un premier temps, autour de l'AGI,* comme l'a regretté Rumen Bojkov. Ce Bulgare de naissance, qui deviendra par la suite Secrétaire de l'IO3C entre 1984 et 2000 (et, pendant cette période, bi-citoyen canadien), cherchera bien à donner du poids à la recherche sur l'ozone de l'Est (lui qui avait obtenu un diplôme de second cycle universitaire en météorologie et géophysique à l'Université de Sofia (1955), puis un doctorat ès physique et mathématique à l'Université de Moscou (1964), avant d'entreprendre une thèse de doctorat en physique atmosphérique à l'Université de Rostock (RDA ; thèse soutenue en 1971)). Mais, lors de la Conférence Quadriennale sur l'Ozone de Septembre 1968 (Monte Carlo), soit une décennie après l'AGI et dans un contexte de Détente, R. Bojkov pouvait encore déplorer « les divergences de la plupart des données issues des ozonomètres de type M-83 à filtre large-bande [soviétiques], avec celles des instruments Dobson ».

---

[161] Dans le premier *Scientific assessment of stratospheric ozone* de 1989, c'est-à-dire dans le premier grand rapport international post-1985 sur l'ozone, Mégie et ses collègues décrivaient ainsi les ozonomètres soviétiques :

"*Filter Ozonometers M-83 and M-124*

"Since 1957, routine ground-based total column ozone measurements have been made at more than 40 stations in the USSR using a filter ozonometer instrument designated as type M-83 (not to be confused with the Standard Dobson ozone spectrophotometer, which was the 83rd instrument manufactured of the Dobson type). The filter-type instrument is based upon the same principle as the Dobson spectrophotometer in using differential absorption of ultraviolet radiation in the 300-350 nm Huggins band of ozone. The M-83 instrument, however, uses two broadband filters and measures the relative attenuation of the solar ultraviolet radiances either directly from the sun or indirectly from the zenith sky (Gustin, 1963). […] Improved filters were introduced into the M-83 instrument starting in 1972-1973 (Gustin, 1978). […]

"A much newer, reportedly improved instrument designated as M-124 has been installed in many stations since 1986 (Gustin and Sokolenko, 1985), but no ozone data have been reported yet for this instrument. No trend data with the M-124 can be expected for about a decade unless the data can be satisfactorily cross-calibrated with the M-83 data from the same location." [Mégie *et al.*, 1989]

A l'occasion de cet évènement, toutefois, des suggestions vont être faites en vue d'homogénéiser les résultats donnés par les instruments Dobson et les instruments russes. La standardisation des résultats obtenus avec l'appareil de l'Est et l'appareil de l'Ouest, qui s'appuie notamment sur des exercices d'intercomparaison fréquents, est bel et bien devenue *l'enjeu central* de la science de l'ozone. En 1968, la communauté consentait, enfin, à prendre le problème à bras-le-corps, semble indiquer le récit de Bojkov [Bojkov, 1969 **in** Bojkov, 2010, p. 38 ; Bojkov, 2010]. De nos jours, le réseau de mesures d'ozone au sol est partagé entre spectromètres "Dobson" à prisme, spectromètres "Brewer" à réseaux de diffraction, et des instruments à filtres d'interférence qui demeurent presque exclusivement localisés en ex-URSS (voir Figure 21 ci-dessous) :[162]

[162] Les échanges et efforts de standardisation entre URSS et Occident se sont intensifiés à partir des années 1970. On retrouve même, au cours des décennies suivantes, quelques spectrophotomètres Dobson et Brewer à bord des satellites russes, ainsi que sur le sol russe. En revanche, les spectromètres à filtre ont presque disparu des stations en dehors de l'ex-URSS. Quelques chercheurs occidentaux avaient pourtant contribué quelque temps au développement de tels instruments. Par exemple, Matthews, Basher et Fraser (du 'Max Planck-Institut für Aeronomie', Allemagne de l'Ouest, et du 'Department of Physics of the University of Canterbury' de Nouvelle-Zélande), qui annonçaient, en 1974 qu'ils venaient de développer un instrument à filtre « qui satisfaisait tous les critères » requis par le 'Report of the Panel on Ozone reported to the Committee on Atmospheric Sciences of the US NAS/NRC' de 1965, « tout en mesurant la quantité d'ozone totale dans l'atmosphère avec une acuité comparable au spectrophotomètre Dobson ». [Matthews *et al.*, 1974, p. 931]

Par contre, les pays d'ex-URSS ont bel et bien perpétué leur tradition de spectromètres à filtre, qui demeurent de loin les instruments qu'ils utilisent le plus. De nos jours, des mesures quotidiennes d'ozone total sont réalisées sur un réseau d'une trentaine de stations de mesure d'ozone équipées d'ozonomètre à filtre M-124, réparties dans la Fédération de Russie, l'Ukraine et le Kazakhstan. Le 'A.I. Voeykov Main Geophysical Observatory (MGO)' procure les soutiens logistiques. Point important : les calibrations des M-124 se réalisent à présent sur un spectrophotomètre Dobson russe de référence, lui-même calibré de manière quadriennale au Centre européen de Calibration de l'OMM, comme le stipule le 'Russian Federation National Report on Studies of the Earth Ozone Layer' de 2011.

Depuis les années 1970, l'OMM a publié plusieurs rapports sur la bonne utilisation des spectromètres Dobson, dont un grand rapport de 140 pages intitulé « Operations Handbook – Ozone observations with a Dobson Spectrometer », en 1980. Pas de rapport spécifique de l'OMM, en revanche, sur les spectromètres à filtre d'interférence, ni sur les appareils, plus marginaux, à réseau de diffraction ou à fente. [« Dobson-Brewer-SAOZ-Ozone Sonde in Russia », 2008, http://www.vdor-2008.narod.ru/Dobson-Brewer-SAOZ-Sonde.html (le 10/01/2012); *Russian Federation*, 2011; *WMO*, 1980 ; Matthews *et al.*, 1974 ; *WMO/UNEP/*…, 2011, p. 2.6] L'OMM conseille même aujourd'hui sans ambages à la Fédération de Russie de changer ses instruments. L'article « 5.3.2.8 » du rapport final abrégé de la « Commission des sciences de l'atmosphère » de l'OMM de 2010 allait comme suit :

> « La Commission a pris connaissance des observations de l'ozone total effectuées par la Fédération de Russie au moyen d'ozonomètres à filtre (M124/M83) couvrant une large superficie de la Sibérie. Ces instruments sont étalonnés régulièrement à l'aide de l'instrument Dobson de Saint-Pétersbourg, lequel est étalonné d'après l'instrument de référence européen. La Commission a exhorté la VAG [(en anglais, le GAW ('Global Atmosphere Watch') – voir plus loin] de l'OMM à aider la Fédération de Russie à remplacer ces ozonomètres à filtre par des instruments Brewer et SAOZ [le spectromètre français « Système d'Analyse par Observation Zénitale », développé par le Service d'Aéronomie (aujourd'hui LATMOS)] plus précis. Entre-temps, il convient de maintenir et de renforcer les comparaisons entre les ozonomètres à filtre et le réseau Dobson mondial. » [*OMM*, 2010, p ; 28]

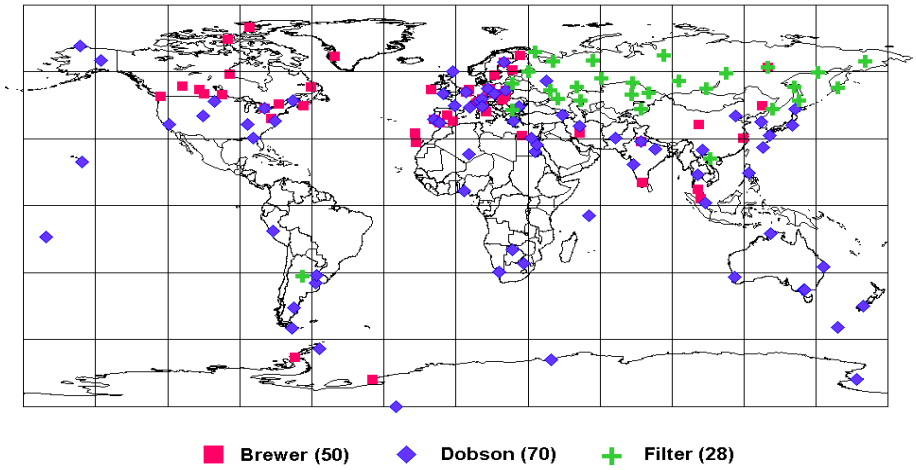


Figure 21 : Géographie des instruments de mesure au sol de la colonne totale d'ozone du Système GAW ('Global Atmosphere Watch') de l'OMM, entre 2001 et 2004, répartis entre spectromètres Brewer (en rouge), spectromètres Dobson (en bleu) et ozonomètres à filtre M-83 (ou « M-124 ») (en vert)
[Jalkanen, 2009, « Slide n°23 »]

Corollaire de cette différence d'instrumentation et plus généralement de la relative marginalisation de l'aéronomie soviétique : bien que les chercheurs de l'URSS des années 1940-60 soient très actifs dans les recherches sur la moyenne et la haute atmosphère, ils sont peu nombreux dans les colloques internationaux sur l'ozone et leur présence décroît dans les grandes revues scientifiques. R. Bojkov affirme que le réseau de stations de mesures de l'ozone total et de la distribution verticale d'ozone s'était certes élargi lors de l'AGI, en particulier dans les régions polaires du Canada, de l'URSS et de l'Antarctique ; mais, le Bulgare ne relève qu'une unique présentation russe, celle de Schneiderov sur les « explosions thermonucléaires et leur effet néfaste sur l'ozonosphère », lors du 'Symposium on Atmospheric Ozone and Problems of the Upper Atmosphere' de septembre 1957 (Onzième assemblée de l'IUGG ; Toronto). Même tendance à l'IO3C : entre la Rencontre de Rome (septembre 1954) et celle de Ravensburg (juin 1956), le nombre de membres augmenta de quinze à vingt-et-un, sans qu'aucun Soviétique n'entrât. Il faudra attendre 1957 pour qu'un Soviétique, le Professeur Alexandar Khr. Khrgian, n'intègre l'IO3C (l'institution compte alors vingt-trois membres). La partie ozone de l'AGI, qui a débuté au cours de cette même année 1957, se fit également, largement, sans l'URSS (comme sa partie sismologie). Enfin, sur les cent-dix participants à l''International Radiation Commission Session' d'Oxford (rencontre des membres de l'IO3C et de la 'Radiation Commission', sponsorisée par l'OMM et l'ICSU), en juillet 1959, soit un an après la fin de l'AGI, six seulement étaient issus de l'URSS. [Bojkov, 2010, pp. 36-37 & 24-27 ; Ohring *et al.*, 2009, pp. 1679-1680]

On s'étonnera moins, en revanche, de ne compter parmi les invités de la rencontre d'Oxford un unique chercheur japonais, et aucun Chinois. On constate, par contre, une

inclusion précoce de quelques chercheurs du Sud. Mais, ils sont tous issus de pays ayant appartenu aux empires coloniaux français et britannique, ou sur le point de s'en émanciper : Henri Masson, Sénégal ; Kalpathi Ramanathan, Inde ; D.O. Vickers, Nigéria ; D.B. McMullen, Ghana ; T.A. Bossua, Afrique du Sud (Remarque : il s'agit de pays que l'OMM peut soutenir par le truchement de son « programme d'assistance technique » [*cf.* Edwards, 2010, pp. 193-202]).[163] C'est véritablement la construction, au tournant des années 1980, d'une expertise sur la destruction de l'ozone stratosphérique en vue d'un accord international impliquant les pays émergents producteurs ou consommateurs de CFC, qui va encourager la "discrimination positive" en faveur des pays non traditionnellement impliqués dans la science de l'ozone.[164]

Nous voudrions à présent replacer ces difficultés d'échanges de données sur l'ozone entre l'Est et l'Ouest, au sein de la stratégie de « globalisme infrastructurel » (ou « mondialisme infrastructurel », 'infrastructural globalism') de l'OMM qu'a décrite Paul Edwards (parfois avec son collègue Clark Miller), dans plusieurs articles (en particulier, Edwards, 2006, "Meteorology as Infrastructural Globalism"), puis dans l'ouvrage *A Vast Machine* (Edwards, 2010)[165]. La plupart des infrastructures à grande échelle productrices de "données", écrit P. Edwards, se sont développées selon le schéma suivant :

---

[163] En septembre 1954, soit cinq ans auparavant et six ans après la création de l'IO3C, s'était par ailleurs tenue la Conférence de Rome sur l'ozone, en marge de la dixième Assemblée de l'IUGG. Elle avait réuni trente-deux participants, issus de onze pays. Les membres élus de l'IO3C d'alors se nomment A. Adel, D. Chalonge, G.m.B. Dobson (Président), A. Ehmert, E.H. Gowan, H. Köhler, Y. Miyake, Sir Charles Normand (Secrétaire), K.R. Ramanathan, Erich Regener, Victor H. Regener, W.C. Swinbank, E. Tönsberg, E. Vassy et Harry Wexler [Bojkov, 2010, pp. 26-27]. Dans cette liste, seul Miyake, japonais, représente l'Extrême Orient (Miyake travaille alors à l'Institut météorologique de Tokyo [*Japonese Meteorological Research Institute*, 2011, « Papers in Meteorology and Physics, Vol. 1 à 5, 1950-1955 », www.mri-jma.go.jp/Publish/Papers/DATA/01to05_en.html (le 03/11/2011)]). La présence de l'Indien K.R. Ramanathan n'est guère étonnante, tant on connaît les liens qui unissent l'Inde au Royaume-Uni (l'Inde a de plus adhéré au 'Commonwealth of Nations' en 1947). En 1959, toutefois, l'IO3C et la Radiation Commission comptent dans leur rang presque exclusivement des Européens, des Russes et des Nord-américains, qui provenaient des pays qui avaient jusqu'alors bâti la quasi-totalité de la tradition scientifique sur l'atmosphère globale que soutenait l'ICSU. [Ohring *et al.*, 2009, pp. 1679-1680]

[164] Les importants budgets alloués à la recherche aux Etats-Unis au cours des décennies d'après-guerre conduiront à une hégémonie du pays sur les sciences de l'environnement global, d'autant plus sur l'ozone, dont la destruction anthropique allait faire l'objet de controverses violentes dans les années 1970 (voir Partir B). Toutefois, les autres grands pays traditionnellement contributeurs à la science de l'ozone fourniront de grandes figures scientifiques – même si les Etats-Unis débaucheront nombre de ces chercheurs européens et asiatiques… Enfin, les scientifiques asiatiques restés dans leur pays n'ont guère produit de travaux sur l'ozone jusqu'à nos jours.

Une politique de discrimination positive des Occidentaux à l'égard des chercheurs des pays en développement existe depuis la formation d'une expertise internationale sur la destruction de l'ozone dans les années 1980. Les quelques rares chercheurs asiatiques que l'auteur de cette thèse a rencontrés lors de la Rencontre de finalisation du rapport international 2010 sur la destruction de l'ozone (*Scientific Assessment of Ozone Depletion* ; *WMO/UNEP/…*, 2011) aux Diablerets (Suisse ; 29 juin-3 juillet 2010) n'étaient nullement des chercheurs spécialisés dans les recherches sur l'ozone, mais sur le changement climatique. La recherche asiatique sur le climat est active depuis les années 1990, et s'est fortement intensifiée dans les années 2000. En 2007, le Chinois Guoxiong Wu a été nommé à la tête de l'IAMAS. Quant au chercheur chilien avec lequel l'auteur a discuté, Patricio Aceituno, il travaillait principalement sur des questions de climat, de météorologie et pollution régionaux.

[165] Paul Edwards expose ainsi le projet de son ouvrage *A Vast Machine*, publié en 2010. Ce travail, écrit-il, ne se donne pas l'ambition de couvrir tous les aspects de la construction scientifique du changement climatique (il est

1) du simple « système » de mesure contrôlé par une poignée d'acteurs ;
2) vers un « réseau », c'est-à-dire un système d'observation et de prévision qui aspire à être parfaitement uniforme, planifié et centralisé, dont chaque partie, chaque personne travaille d'après un unique ensemble de normes et de techniques ;
3) vers « globalisme infrastructurel » (que P. Edwards nomme également un « web », ou une « stratégie inter-réseaux »), qui parvient, tout en maintenant une diversité de systèmes et de réseaux, à faire tourner « un réseau de réseaux » fonctionnel (« au moins pour certaines applications particulières »), sur la base « d'un consensus approximatif et d'une règle évolutive ('a rough consensus and a running code') » – *cf.* le cri de guerre des architectes d'Internet !). [Edwards, 2010, pp. 14-16]

Paul Edwards décrit le 'World Weather Watch' (WWW) comme le premier 'web' des sciences de l'atmosphère, et même plus généralement comme le premier 'web', « plusieurs décennies avant le 'World Wide Web' » (même si, à la même époque que le 'World Weather Watch', un autre exemple de « globalisme infrastructurel » fut atteint par le biais du 'Limited nuclear test ban treaty' (LTB), signé en 1963 par les Etats-Unis, le Royaume-Uni et l'Union Soviétique (puis ratifié par 100 autres pays) [Edwards, 2010, p. 226]). Initié pendant l'AGI , fruit du travail préparatoire de Wexler et Bugaev, puis structure officielle de l'OMM à partir de 1963, le WWW se développe comme un 'web' à partir des années 1960 (l'appellation 'World Weather Watch' datant de 1967 seulement). Le globalisme nouveau qui naît alors n'est plus uniquement le résultat d'un « internationalisme volontaire, basé sur des intérêts communs », comme cela avait été le cas de la forme première d'institution de gouvernance météorologique globale, l'IMO (1878-1950), mais d'un « globalisme presque obligatoire, basé sur une infrastructure partagée plus permanente », plus invasive [Edwards, 2010, pp. 226 & 14-16 ; Edwards, 2006, p. 229].

Dès 1950, les objectifs premiers de l'OMM sont *(a) la maintenance et l'accroissement* du nombre de stations météorologiques dans le monde, et leur coopération, et *(b) la création et la maintenance d'un système rapide d'échange d'informations* météorologiques (Article 2 de la Convention de l'OMM, 1950). Au moment de sa création en 1950, si les météorologistes ont déjà, « depuis de nombreuses décennies, accepté un globalisme informationnel – le principe qui veut que les données standardisées du monde entier soient collectées de manière

particulièrement focalisé sur les aspects "température et circulation atmosphérique", et délaisse largement les études paléoclimatiques, la fonte des glaciers et des calottes glacières continentales et les aspects "température et circulation océanique"). En outre, il ne s'est pas intéressé en détail « aux incertitudes scientifiques, à l'assimilation de la science dans la sphère politique ou la compréhension de cette science par le grand public ». De nombreuses études existent déjà sur ces sujets. *A Vast Machine* ne se pose pas non plus la question des impacts du changement climatique, de la réduction de ses effets, ou encore de comment ralentir sa progression. L'histoire que propose P. Edwards est « un récit de la science du climat en tant qu'infrastructure globale de connaissances ('climate science as a global knowledge infrastructure') » (voir corps du texte pour une définition). [Edwards, 2010, p. 8-9]

routinière et partagée – », assure P. Edwards, chaque service météorologique national maintient encore ses propres normes et systèmes. Ces services sont suffisamment semblables pour être connectés jusqu'à un certain point, mais suffisamment différents pour rendre impossible une inter-opérationnalité authentique au niveau international. En d'autres termes, vers 1950, le parc international de production de données météorologiques demeure principalement au stade « 1 » de systèmes non connectés (même s'il existe quelques exceptions régionales, ou des réseaux connectant métropoles et espaces coloniaux) [*United Nations*, 1951, p. 951 ; Edwards, 2010, pp. 14-16]. En ce qui concerne l'ozone, ce stade « 1 » de simple « *système* » de mesure contrôlé par une poignée d'acteurs a été décrit dans le Sous-Chapitre 1.1 : il s'agissait d'une entreprise, contrôlée à presque tous ces stades, de *"duplication" de l'instrument et des méthodes de G. Dobson*.

Au cours de sa première décennie d'existence, poursuit P. Edwards, l'OMM va s'ingénier à faire évoluer les pratiques de la communauté des météorologistes vers le stade « 2 » de *réseau* interconnecté. Le maître-mot est alors la *négociation intensive de normes techniques* sur les mesures météorologiques. C'est le projet au cœur de la "très britannique" IO3C des débuts, dont les objectifs primitifs définis en 1948 sont simplement d'« organiser une recension générale sur l'ozone pour l'Europe de l'ouest, et dans le même temps aider à l'implantation des stations d'ozone dans d'autres parties du monde lorsque l'opportunité se présente », et de « guider les opérations des différentes stations afin qu'elles soient conduites de manière comparable » [Ozone, 1948 **in** IUGG Procès-verbaux des séances de l'Association de Météorologie, Publication AIM No,9/ b, 32-4, Bruxelles, 1952 **in** Bojkov, 2010, p. 22]. Même tonalité à l'OMM. Les préparatifs du programme de l'ozone de l'AGI que nous avons décrits, qui sont dus en partie à l'OMM, marquent indiscutablement une telle transition vers le deuxième stade de globalisme, auquel doivent notamment contribuer les « principes directeurs » que le Professeur J. Van Mieghem rédige en 1956 pour diverses études : les observations météorologiques habituelles (synoptiques et dynamiques) ; les mesures de radiation solaire ; et, enfin, les mesures spectroscopiques d'ozone atmosphérique [*Bulletin WMO n° 55* **in** Nicolet, 1982, p. 227]. L'infrastructure de mesures d'ozone a donc évolué du *système* au *réseau* ouest-européen, d'abord sous l'impulsion de Dobson, dès les années 1930, puis au sein du réseau élargi de l'IO3C et du GO3OS des débuts. Les instruments sont alors presque tous des Dobson, et l'IO3C centralise les données (à Oxford)… Mais, lorsqu'il s'agit d'étendre l'échange de données GO3OS aux instruments dissemblables des chercheurs soviétiques, des écueils infranchissables de standardisation se dressent.

De manière plus générale, lors de l'AGI et dans son sillage, l'instrumentalité des mesures d'ozone devient de plus en plus composite. Le problème de standardisation ne se

limite pas aux ozonomètres soviétiques et occidentaux au sol. Des spectrographes et des spectromètres sont embarqués dans des ballons et des fusées météorologiques lancés vers la haute atmosphère, dès l'AGI (pas moins de 10 000 fusées-sondes seront lancées entre 1957 et le début des années 1980 [Nicolet, 1982, p. 229] ; voir Figure 22, *infra*). Puis, quelques années plus tard, les premiers instruments spatiaux de mesure spectrale pertinente pour l'ozone : les dispositifs états-uniens SBUV ('Solar Backscatter UltraViolet') lancés à partir de 1970, puis TOMS ('Total Ozone Mapping Spectrometer') mis en orbite sur Nimbus 7 en 1978 ; ou encore, en 1991, une seconde version de TOMS (un instrument de la NASA, donc), cette fois-ci chargée à bord d'un satellite soviétique, Meteor-3. Or, à mesure qu'un réseau agrège des ozonomètres divers, des engins-porteurs d'ozonomètres multiples et, surtout, différentes traditions internes aux laboratoires ou nationales, il perd en cohérence. Les infrastructures de l'ozone de l'OMM (le GO3OS) et de l'IO3C vont alors devoir rapidement évoluer vers un stade « 3 » : une *« stratégie inter-réseaux »*, un web, un « globalisme infrastructurel », qui va ressembler au premier d'entre eux, le 'World Weather Watch' (WWW) de l'OMM.

Quelle sera la principale vocation de ces 'webs' ? Pas tant de standardiser les normes techniques, ce qui devient une gageure face à un tel foisonnements d'instruments et d'acteurs, que *relier les réseaux météorologiques nationaux aux systèmes et réseaux de mesure, de calcul et de communication de pointe* : les systèmes d'observations internationaux océaniques et spatiaux, le traitement de données informatique, et les réseaux de communications. Le « globalisme infrastructurel », conscient de l'incapacité structurelle à faire fonctionner des réseaux standardisés à l'échelle globale, *mise sur la télécommunication et sur le traitement correctif des données par informatique*. En d'autres termes, la vitesse de communication et la quantité de données échangées doivent pouvoir "compenser" les biais dus à la diversité des sources de mesures. [Edwards, 2010, pp. 188-202 & 229-230 ; voir en outre Edwards, 2010, Chapters 8 &9] Comme le souligne Marcel Nicolet : dans son rapport de 1956, son compatriote de l'OMM Jacques Van Mieghem ne se contente pas de donner des normes techniques directrices pour le programme OMM de l'AGI ; « l'analyse de la distribution géographique du réseau de stations d'observation, a-t-il décelé, soulève le problème des télécommunications et de la distribution de l'information recueillie lors de l'AGI » [Mieghem, 1956, *Bulletin WMO n° 55* **in** Nicolet, 1982, p. 227].

Une telle construction de « globalisme infrastructurel », devenue banale aujourd'hui à l'heure d'Internet, nécessite de fournir d'énormes efforts dans les années 1960. Il ne s'agit plus, de simplement « faciliter les flux globaux d'information », comme dans le cas des formes de globalisation à l'aide de technologies de l'information et de la communication (TIC) « non spécifiques » qu'ont décrites la plupart des théoriciens de la globalisation (postes, télégraphes, téléphone), écrit Paul Edwards. « Les infrastructures TIC

dédiées à des formes spécifiques d'information mondialiste ('globalist') », telles que le 'World Weather Watch', ne se contentent pas de faciliter les flux d'information, mais « de produire cette information, et de contrôler sa qualité. Spécifier des normes mondiales pour relier les systèmes de communication facilite certes la mondialisation ('globalization') ; mais spécifier des normes uniformes d'information globale *produit activement une compréhension du monde dans son entier* » : avec « le globalisme infrastructurel, « le monde » dans son entier est produit et maintenu(aussi bien comme objet de savoir et arène unifiée d'action humaine), à travers des infrastructures mondiales » (ou, pour le dire autrement : « *des complexes institutionnels-technologiques d'échelle mondiale, unifiées et permanentes* »). P. Edwards pense que nous devrions regarder de la sorte le projet météorologique de l'OMM à partir des années 1960 (voire 1950, sous certains aspects) [Edwards, 2006, pp. 239 & 229]… projet auquel nous pouvons ajouter, avec l'étude que nous venons de proposer dans ce Sous-chapitre 3.2 : le projet scientifique sur l'ozone… qui est, ce qui est cohérent, porté partiellement par l'OMM, comme le WWW fut porté par l'OMM.

Le 'web' de l'ozone sera toutefois plus long à mettre en place que le 'web' 'World Weather Watch'. Au cours de la décennie 1950-60, l'OMM concentre en effet ses efforts sur le WWW, qui constitue son activité centrale (c'est encore le cas aujourd'hui). La tâche est rude, titanesque. Mais, les marches sont gravies rapidement. Sous la poussée vertueuse des satellites météorologiques (TIROS-1 de la NASA donne des résultats encourageants en 1960 ; et, l'année précédente, l'OMM a mis en place un Panel d'experts sur les satellites artificiels, rassemblant les représentants soviétiques et états-uniens) et de l'avènement des modèles numériques de prévision du temps, qui réclament des échanges de données en temps réel à l'échelle de la planète, la mise en œuvre du WWW sera effective dès 1967, avec pour objectifs une collecte de données aussi automatique et globale que possible, un système mondial de télécommunication, et le traitement de données informatisées en temps réel pour des études météorologiques et climatiques [Edwards, 2006, p. 248]. L'effort de l'OMM est moins soutenu en ce qui concerne la construction d'autres 'webs' tels que celui de l'ozone (bien que le nombre de données à traiter soit beaucoup plus limité que celles du WWW).[166] Outre la disparité d'instruments entre URSS et Occident, *l'échange d'information sur*

[166] Au cours des dernières années, l'OMM a, à ce propos, cherché a étendre son système d'échange des données, par la mise en place d'un « Système d'information de l'OMM (SIO) ». Dans le second numéro du *Bulletin de l'OMM* de 2013, le correspondant allemand pour le SIO, Markus Heene, vantait ses mérites :

> « D'immenses efforts ont été accomplis depuis deux ans pour que le Système d'information de l'OMM (SIO) soit pleinement opérationnel. Les trois grands Centres mondiaux du système d'information qui ont permis le lancement officiel du SIO en janvier 2012 ont été rejoints par quatre centres, et huit autres viendront s'y ajouter en 2014. Ensemble, ces quinze centres joueront un rôle de premier plan pour que le système mondial d'échange de données sur le temps, le climat et l'eau entre dans l'ère d'Internet. L'infrastructure étant pratiquement achevée, les prochaines années verront se concrétiser les énormes

l'ozone requiert un effort économique et humain auquel l'OMM ne peut consentir dans les années 1960. Lors de la Conférence Quadriennale sur l'Ozone de Septembre 1964 (Albuquerque, Mexique), « on reconnut que l'échange de données d'ozone par le réseau de télécommunication de l'OMM serait utile à la météorologie synoptique » (à l'échelle de 1000 km et au-delà). Pourtant, rapporte Rumen Bojkov, la proposition du Russe Genady Gustin, d'échanger quotidiennement les données d'ozone de plus de 25 stations soviétiques par les tuyaux de l'OMM, ne fut pas retenue. Pire, déplore Bojkov, « cette vision à court terme de l'IO3C ('this short-sighting of the IO3C') » et de l'OMM se prolongea jusqu'à l'annonce du trou de la couche en 1985. C'est alors seulement que des données (prises au sol ou par satellite) commenceront à être échangées de manière routinière entre l'Occident et l'URSS à l'intérieur du « système OMM ». Un 'WMO Ozone Mapping Centre' sera créé à cette occasion, abrité par l'Université de Thessalonique. [Bojkov, 2010, pp. 34-36]

En définitive, bien que presque limitée aux seuls spectromètres et donc faiblement interinstrumentale, la « stratégie inter-réseaux » internationale de l'ozone demeure balbutiante dans les années 1950, 1960 et même jusqu'en 1985. Le GO3OS reste *efficace* seulement au stade « 2 » de simple "réseau (de) Dobson", un système d'observation et de prévision uniforme, planifié et centralisé à Oxford, très peu étoffé en dehors de l'Europe de l'ouest, même en Amérique du nord. Les colloques et symposiums de l'OMM et de l'ICSU, théâtres de l'activisme de R. Bojkov en faveur d'échanges plus nombreux entre chercheurs de l'Est et de l'Ouest, sont insuffisants à mener le GO3OS à une coopération de type « globalisme infrastructurel », qu'atteint le WWW dès le milieu des années 1960. Soulignons qu'ils préparent, néanmoins, le terrain du 'web' de l'ozone à venir… Et du 'web' de la chimie atmosphérique à venir, dont le GAW ('Global Atmosphere Watch'), produit de la fusion du GO3OS et du 'Background Air Pollution Monitoring Network' en 1989, sera une incarnation manifeste (voir Sous-chapitre 3.2). Précisons que, depuis le début des années 2000, les archives internationales de mesures spectrométriques d'ozone sont centralisées au 'WMO/GAW World Ozone and Ultraviolet Radiation Data Centre' (WOUDC) de Toronto.

---

avantages que promettait d'apporter ce concept novateur, puisque tous les Membres de l'OMM contribueront activement au SIO et transmettront davantage de données.

« La mise en place du SIO découle d'une résolution adoptée en 2003 par le Congrès météorologique mondial en vue d'étendre et de renforcer la gestion et la diffusion des données détenues par les Membres. Avant 2003, la Veille météorologique mondiale (WWW) et les programmes associés étaient seuls à pouvoir échanger des données, par le biais du Système mondial de télécommunications (SMT). Grâce au SIO, d'autres programmes de l'OMM et initiatives internationales peuvent aujourd'hui transmettre et consulter ces données et tous les utilisateurs bénéficient de meilleurs services de gestion et de recherche. Pour assurer une évolution sans heurt, le SIO repose sur l'architecture du SMT, tient compte des installations et investissements existants et offre assez de souplesse pour que les systèmes participants puissent étendre leurs capacités en fonction de l'évolution des responsabilités qui sont les leurs à l'échelle nationale et internationale. » [Heene, 2013, p. 25]

Nous le voyons, le globalisme infrastructurel de l'OMM continue aujourd'hui de se renforcer, et l'on voit ses formes évoluer, notamment avec le recours croissant à Internet. En outre, les utilisations d'Internet se diversifient, jetant des passerelles "en temps réel" entre monde scientifique et citoyens.

Les transferts de technologies vers les pays moins argentés

Comme l'a montré P. Edwards au sujet de la météorologie et du changement climatique, et comme nous l'avons montré au sujet de l'ozone avant 1970, l'OMM a joué un rôle « technopolitique » aux heures les plus tendues de la Guerre froide. A travers des transferts de normes techniques d'appareils, la coordination des services météorologiques nationaux, l'échange gratuit et exhaustif de données météorologiques rendu presque obligatoire, *etc*., elle a créé une pérenne « organisation internationale globale » – cette « réorientation mutuelle », mondiale, des programmes scientifiques ayant eu pour corollaire, précisons-le, sans doute de « limiter en règle générale le pouvoir des gouvernements nationaux », mais aussi dans le même temps, de servir des intérêts occidentaux (et surtout états-uniens) et soviétiques, comme l'a fait doublement remarquer P. Edwards [Edwards, 2006, pp. 245-249].[167] De manière plus "triviale", les décennies d'après-1945 ont été le lieu d'un processus intense de cooptation de nouvelles nations dans le grand orchestre de la météorologie, et en particulier des mesures dans la moyenne et haute atmosphère. Outre les premiers travaux d'intercomparaison entre instruments de mesures d'ozone, outre les tentatives d'élargissement de la communauté d'ozone, qui passent par l'invitation de scientifiques de nombreux pays dans les rencontres internationales de l'ICSU et de l'OMM, des "transferts de technologies" ont alors eu lieu pour stimuler la recherche sur la moyenne atmosphère.

Parmi les technologies, se trouvent des technologies belligérantes recyclées en instruments de mesures atmosphériques. Après-guerre, le missile allemand V2, ou des prototypes de fusées, tels que la fusée *Véronique* en France, deviennent en effet des fusées météorologiques, qui transitent jusqu'à la haute atmosphère. Willis Lee Webb s'appuiera

---

[167] Paul Edwards écrit :

> "The IGY served significant ideological purposes for both superpowers, which used their scientific collaboration to promote their technological prowess and their commitment to peaceful coexistence. Internationalism may have been indigenous to science, but in the IGY it would be used, in a marriage of convenience, to help guarantee American (and more broadly Western) political interests. As Ron Doel has observed, this argument implies a kind of co-optation. Instead, the situation was one of what I have called "mutual orientation." Science would be used to promote a particular vision of world order, but in exchange scientists could better pro- mote their own. Their involvement in government and governance would, in the long run, produce pressures to which governments would be forced to respond. Ozone depletion and climate change are major cases in point. […]
>
> "Has infrastructural globalism in meteorology limited the power of national governments? Generally, the answer must be yes. The globalization of data networks makes it almost unthinkable, not to mention unaffordable, for most nations to develop separate, independent networks or standards. Even military meteorology now relies heavily, though not exclusively, on data provided by public, civilian networks. As an example, in the 1990s some European governments began to contemplate recovering costs by selling meteorological data (in contravention of centuries-old traditions), draining data from the WWW. In response, the WMO – prodded by the United States – defined "basic" data that member states are required to share freely (*Cf.* WMO Resolution 40, adopted at the Twelfth World Meteorological Congress (1995), reaffirms the principle of free exchange of basic data and defines a set of shared "supplemental" data that cannot be used commercially in the country of origin. For example, French supplemental data cannot be used to make French forecasts that are sold instead of freely distributed.). Despite some ongoing resistance, most governments are complying." [Edwards, 2006, pp. 245-246 & 249]

ainsi dans une part importante sur des mesures réalisées à l'aide de fusées météorologiques pour écrire son ouvrage *Structure of the stratosphere and mesosphere* (Webb, 1966).[168] Ces fusées étirent encore un peu la longue liste des technologies développées au cours de la Seconde guerre mondiale, qui ont poursuivi après-guerre leurs trajectoires, s'incarnant dans des instruments civils et/ou de "physique fondamentale" (en physique nucléaire et microphysique des particules, en radioastronomie, spectroscopie, optique, électromagnétisme).[169]

Et, de fait, tout comme les missiles guidés sous-marins, les missiles guidés atmosphériques ont été des technologies cruciales pour les sciences de l'environnement physique d'après-guerre. Comme l'a rappelé Ronald Doel, les planificateurs militaires avaient pris conscience que les missiles V-2 capturés en Allemagne à la fin de la Seconde guerre mondiale, « une fois renforcés et améliorés, seraient capables de transporter rapidement des armes conventionnelles et atomiques vers des destinations lointaines, faisant d'eux une arme de première importance. » Mais, parallèlement, l'estimation de la trajectoire précise de ces engins et l'amélioration de leur guidage par ondes électromagnétiques appelaient de nouvelles mesures stratosphériques, ionosphériques, géomagnétiques et gravitationnelles… que des engins-prototypes du même type pouvaient eux-mêmes se charger d'effectuer en grande partie [Doel, 2009, pp. 148-150] ! Rapidement, certains missiles atmosphériques furent mêmes exclusivement consacrés à l'étude de l'atmosphère (même si, souvent, les fusées servaient à la fois d'instruments de mesure météorologique et de prototype de fusées – ainsi, la fusée *Véronique* en France).

A partir de 1946, raconte le créateur du Service d'Aéronomie français (1958-2008) Jacques Blamont, « les *V-2* développés en Allemagne pendant la guerre, sont transformés aux Etats-Unis en outils de recherche pour effectuer des mesures *in-situ* à haute altitude. L'aéronomie en est bouleversée, comme elle le sera après 1957 par les satellites ». Le V-2 pouvait réaliser « toute une variété d'expériences » *in situ*, renchérit Richard Goody : « un

[168] Sept ans plus tôt, W.L. Webb avait co-publié un article intitulé "Application of Meteorological Rocket Systems" dans le *Journal of Geophysical Research* (Webb & Jenkins, 1959 (November)). Il y envisageait de créer des systèmes opérationnels d'observation météorologique multi-fusées. Webb officiait alors à l'"U.S. Army Signal Missile Support Agency', sur le site de 'White Sands Missile Range' (Nouveau Mexique).

[169] Dans *How Experiments End* (1988), Peter Galison avait ainsi montré que l'essentiel de l'instrumentation de Bruno Rossi pour son étude des grandes gerbes de rayons cosmiques, après son séjour à Los Alamos, était directement dérivé de celle mise au point par Rossi lui-même dans le cadre du projet Manhattan. « Utilisant l'expertise acquise durant la guerre, les physiciens américains « traduisent » alors leurs savoir-faire en dispositifs multiples – pour expérimenter avec *« des rayons X, des électrons, des positrons, des neutrons, des protons, des rayons gamma […] »*, ou appliquer les techniques de micro-ondes à la conception d'accélérateurs, à la résonance magnétique nucléaire, à la spectroscopie… et, en Angleterre et en Australie, à la radioastronomie », poursuit Dominique Pestre. En outre, dans le même temps, de nombreux résultats de la recherche nationale et finalisée de 1939-45 étaient déclassifiés et publiés dans les revues de physique (en microphysique des particules, optique, électromagnétisme, *etc.* [Galison, 1988 **in** Pestre, 2004 **in** Dahan & Pestre (Dir.), 2004, pp. 204-205 ; Pestre **in** Dahan & Pestre (Dir.), 2004, pp. 195-205]

spectrographe enregistrait le spectre ultraviolet, l'antenne de traînage réalisait des études de densité ionique dans l'ionosphère, des conteneurs de graines se vidaient en vue d'expériences sur la mutation biologique [dans l'atmosphère], et le nez de l'ogive était équipé de conteurs Geiger pour des expériences sur les rayons cosmiques ». De plus, ce que ne montre pas la Figure 22 ci-dessous, « le missile portait des appareils de mesure de température et de pression. » [Blamont, 2008 **in** Chanin (Dir.), 2008, pp. 18-20 ; Goody, 1954, p. 14]

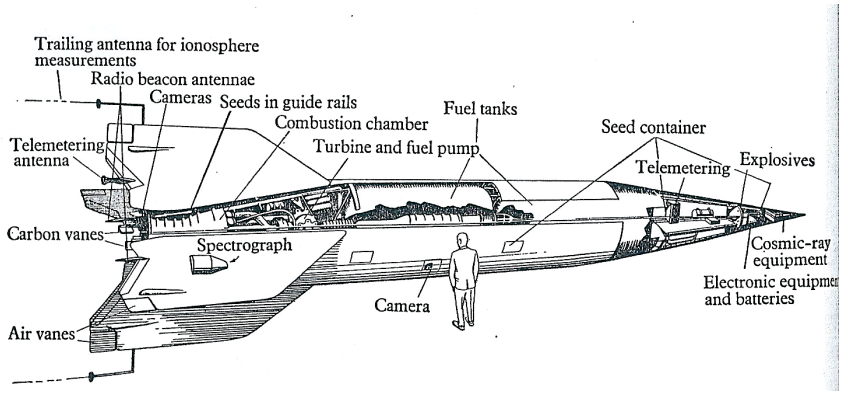


Figure 22 : le missile V-2 équipé pour la recherche scientifique en haute altitude [Goody, 1954, p. 16 (d'après Newell & Siry, 1946)]

Après-guerre, la recherche civile sur l'atmosphère tire donc parti *de technologies militaires devenues obsolètes*. Ainsi, les missiles allemands V-2 sont recyclés aux Etats-Unis et en Europe pour l'étude de la haute atmosphère. Par exemple, la *Véronique* qui fut lancée par la France au cours de l'Année géophysique internationale (la composante spatiale du programme français pour l'AGI reposait sur quinze tirs d'une variante de ladite fusée, dite *Véronique-AGI*) était en fait largement inspirée de la technologie des V-2. Jacques Blamont raconte que cet « engin simple et intelligent » mais non-guidé avait été développé au Laboratoire de recherches balistiques et aérodynamiques (LRBA) de la Direction des études et fabrications d'armement (DEFA) « sous l'inspiration d'ingénieurs allemands qui avaient participé à l'épopée de Peenemünde [(le site de la base militaire où avaient été fabriqués et testés les missiles allemands entre 1936 et 1943)] et en particulier à la mise au point du V-2. [… La *Véronique-AGI*] utilisait des ergols puissants et bon marché, l'essence de térébenthine et l'acide nitrique. La turbopompe du V-2, un cauchemar de plombier, dixit J. Blamont, avait été remplacée par un générateur de gaz, c'est-à-dire une petite chambre où l'on brûlait des composés fournissant des gaz servant à chasser les ergols des réservoirs. » [Blamont, 2008 **in** Chanin (Dir.), 2008, p. 22]

Par ailleurs, dans des pays où les financements publics sont faibles, dans la France en reconstruction par exemple, les chercheurs peuvent compter sur *des prêts et des dons de technologies provenus de pays à l'arsenal aérien et spatial plus étoffé* – les Etats-Unis et l'URSS,

pour la France ;[170] la France, pour l'Argentine ou l'Inde.[171] Or, si ces technologies ne permettent pas de mesurer les concentrations chimiques stratosphériques, elles contribuent en revanche à mieux connaître les conditions physiques de la stratosphère, qui doivent elles être prises en compte dans la chimie de l'ozone.

Pour conclure ce sous-chapitre sur la science "hors militaire" ou "pacifique" de l'ozone, répétons que, à l'inverse de la plupart des études de science aéronomique des décennies 1940-60, la coopération scientifique internationale sur *l'ozone stratosphérique*, réactivée au lendemain de la Seconde guerre mondiale, fut largement étrangère aux financements militaires. En outre, l'Année géophysique internationale de 1957-58 agit comme un formidable stimulus de la science de l'ozone. Elle s'incarna, d'abord, par l'extension spectaculaire du nombre de spectromètres Dobson à travers le monde, et plus généralement par la formation d'un premier réseau international de quantifications chimiques de l'atmosphère, le 'Global Ozone Observing System' (GO3OS).

Initialement nullement un instrument de veille de la couche d'ozone, le GO3OS de l'OMM deviendra l'un des yeux qui en scrutera les probables détériorations, à partir des années 1970. En outre, ce sont les séries de mesures d'un spectromètre 'Dobson' installé au

---

[170] Le Service d'Aéronomie français bénéficia à plusieurs reprises d'apports de technologies étrangères, afin d'étudier la haute atmosphère, officiellement "à des fins de recherche fondamentale, pacifique" : « En 1960, puis en 1961 la NASA mit à [la disposition du Service d'Aéronomie] des fusées *Javelin*, tirées depuis la base de Wallops Island, qui étendirent les mesures de température jusqu'à 400 km d'altitude, et des *Aerobee* tirées en 1962 et 1963 de Fort Churchill (Manitoba) qui permirent de mesurer la température très élevée rencontrée dans la haute atmosphère lors de tempêtes géomagnétiques liées à l'activité solaire (thèse de M.-L. Lory-Chanin). Des mesures de température dans la thermosphère polaire furent conduites entre 110 et 170 km à l'Ile de Heyss de 1967 à 1976 au moyen de 70 fusées-sondes soviétiques *M-1* sous la responsabilité du Service d'Hydrométéorologie de l'URSS. » [Blamont, 2008, **in** Chanin (Dir.), 2008, pp. 173-174]

Ces dons prenaient parfois place dans des collaborations sur la longue durée, entre la France, et les deux Grands de l'aérospatial d'alors. En particulier, « à partir de 1966, [lorsque] le Service d'aéronomie tout en continuant l'étude de la haute atmosphère se tourna vigoureusement vers la recherche planétaire, en exploitant aussi bien la coopération franco-soviétique née à ce moment [(le Service d'Aéronomie se trouve notamment « à l'origine » de programmes d'exploration franco-russes de Vénus (1985) et de Mars (1996) par ballons)] que la compétition organisée par la Nasa pour ses missions. » [Blamont, 2008 **in** Chanin (Dir.), 2008, p. 39]

[171] D'autres pays, encore moins en pointe de la recherche spatiale que la France de Charles de Gaulle, verront les fusées françaises (la fusée Véronique, un fleuron française des années 1960 ; puis, la fusée Centaure) comme une "technologie transitionnelle" vers des fusées capables de mettre des satellites artificiels en orbite – ce qui constituent, à partir des années 1960 un objectif militaire et industriel (communications) pour de nombreux pays. « Les tirs de sodium » dans l'atmosphère à l'aide de fusées, par exemple (technique utilisée alors par les aéronomes français pour étudier les trajectoires de masses d'air), deviennent, selon la formule de Jacques Blamont, « un moyen de s'initier aux techniques spatiales pour les pays qui ont des ambitions dans ce domaine ». Ainsi, avec l' « aide » de la France, « l'Argentine tir[a] plusieurs *Centaure* à sodium en 1962-63 dans un effort brisé par la conjoncture politique. L'aide bénéficia « surtout [à l'Inde,] pour laquelle nous lanç[âmes] dès janvier 1964 plusieurs *Centaure* à sodium à Thumba, première base du sous-continent, équipée par le CNES et la NASA, puis, en 1967, mêmes expériences au Pakistan. Les deux opérations entraîn[èrent] d'importantes commandes de matériel français de la part de ces deux pays et l'organisation de stages en France pour des ingénieurs indiens qui grâce à eux créeront le lanceur de satellites [indien] *SLV* [(1979-83)], dont l'un des moteurs est emprunté à *Ariane*. » [Blamont, 2008, **in** Chanin (Dir.), 2008, pp. 20-33 ; Hauchecorne, 2011]

cours de l'AGI par les Britanniques à la station de Halley Bay en Antarctique, qui permettront à Joseph Farman et ses collègues de rédiger leur fameux article sur le "trou de l'ozone antarctique", publié dans *Nature* en mai 1985 (Farman *et al.*, 1985, "Large losses of total ozone in Antarctica reveal seasonal ClO_x/NO_x interaction").

Plus généralement, de nouveaux programmes internationaux de mesure sur l'environnement géophysique avaient été confiés à des institutions civiles nationales fédérées au sortir de la guerre, et en particulier aux Académies des sciences coalisées au sein de l'ICSU, ou à des organisations onusiennes telles que l'OMM, l'UNESCO, la FAO ('Food and Agriculture Organization'), ou l'OMS (qui contribua à mettre en lien les sites de mesure des pollutions de l'air urbain, notamment). Par la suite, ces mesures, devenues plus nombreuses, mieux standardisées et télécommuniquées en permanence, formeront la pierre angulaire des grands réseaux de surveillance de l'environnement global. Ils sont aujourd'hui utilisés et manutentionnés par l'ICSU, dans le cadre de l''International Geosphere-Biosphere Programme' (IGBP) ou de l''International Human Dimensions Programme on Global Environmental Change' (IHDP), par des consortia ICSU/ONU, tels que des alliances ICSU/OMM (par exemple, le 'World Climate Research Programme' (WCRP)) ou ICSU/UNESCO (par exemple, le Programme international DIVERSITAS sur la biodiversité) ; ou, bien sûr, par des programmes à la charge de l'OMM, tels que le GAW ('Global Atmosphere Watch ; 1989-…), qui a phagocyté le GO3OS.

3.2. La veille internationale du SO_2 et des pollutions acides transfrontières

Comme nous l'avons montré précédemment, lors des premières décennies de la Guerre froide et en particulier dans le cadre de l'AGI, la science de l'environnement global – de l'environnement physique, en particulier – a été utilisée pour promouvoir une certaine vision de l'ordre géopolitique mondial chère aux hautes sphères des complexes militaro-industriels des deux Blocs, tout en permettant aux scientifiques de promouvoir des agendas de recherche plus "fondamentale", notamment par le biais de programmes internationaux. Au cours des décennies 1970-80, à l'image d'autres globalismes, le globalisme infrastructurel de l'OMM/ICSU allait se renforcer. Ce qui se ferait, désormais, souvent au service de thématiques qui parlaient plus aux environnementalistes. M. Nicolet mettra notamment en avant la création par l'ICSU d'un 'Scientific Committee on Problems of the Environment' (SCOPE) en 1969 (plus tard confié, outre à l'ICSU, aux onusiennes UNEP (1972-…) et UNESCO (1945-…), notamment). Comme nous le verrons dans la Partie C, et

ainsi que l'a formulé P. Edwards, le rapprochement des scientifiques d'élite et des élites nationales décisionnaires, qui s'était affermi pendant les années 1940-60, « produirait, sur le long terme, des pressions auxquelles les gouvernements seraient forcés de répondre ». En particulier, sur les impacts des activités humaines sur l'environnement à grande échelle. La destruction de la couche d'ozone et le changement climatique seront « des cas d'espèces majeurs ». [Edwards, 2006, pp. 245-246]

Les pluies acides transfrontières en constitueront un autre. Elles deviendront, par exemple, l'un des sujets d'étude de SCOPE. En 1982, M. Nicolet définissait le programme du comité SCOPE simplement comme « réfléchi pour prendre en considération chaque nouveau facteur que le développement industriel introduisait dans l'environnement humain » [Nicolet, 1982, p. 231]. En fait, SCOPE était moins anthropocentré que ne le laissait entendre l'aéronome. Il avait été établi afin d'identifier et d'estimer plus généralement l'importance de problématiques environnementales globales et régionales, en insistant sur celles qui nécessitaient une perspective interdisciplinaire. A savoir : des études sur les écosystèmes et la diversité biologique, l'invasion d'espèces, l'impact des activités humaines sur les cycles biogéochimiques (carbone, azote, phosphore, soufre et silicium), et les rétroactions entre espèces chimiques, écosystèmes, activité humaine et environnement [*SCOPE*, 2008, p. 8].[172]

Ce Sous-chapitre 3.2 constitue une introduction à l'histoire de la veille des pluies acides, ainsi que du SO_2 et des NO_x, qui sont ses principaux précurseurs mais ont également d'autres effets sur l'environnement. Toutefois, dans la mesure où la théorie des pluies acides fait – en tout cas dans les années 1950-80 – intervenir des réactions chimiques très simples aisément modélisables avec une chimie élémentaire (la cause première de formation de nuages, de brouillard et d'aérosols acides est l'oxydation dans l'atmosphère du SO_2 et des NO_x (émis, notamment, par combustion de matériaux fossiles), qui conduit à la formation d'acides forts, sulfuriques H_2SO_4 et nitriques HNO_3), et dans la mesure où les pluies acides ne sont pas comprises par les scientifiques comme un problème environnemental global – mais continental –, nous ne traiterons que certains aspects de l'expertise sur les pluies acides, utiles à comprendre le récit que nous construisons sur la chimie atmosphérique globale des décennies 1970-2000, dans les Parties B et C.

Les premiers réseaux de surveillance des pluies acides

L'OMM créa le BAPMoN ('Background Air Pollution Monitoring Network') en 1969, avec un Centre de données mondiales installé aux Etats-Unis. Le réseau utilisait toutefois des stations qui avaient été installées pour certaines une quinzaine d'années plus tôt. Elles l'avaient été

[172] Sur le rôle géopolitique de SCOPE, voir Melillo Jerry, 2008, "Appendix 4: SCOPE's development over the past four decades" **in** SCOPE, 2008, pp. 31-33.

dans des régions polluées ou reculées, afin d'estimer la pollution de fond, non seulement le CO_2 (dans la lignée de Keeling lors de l'AGI), mais aussi les pollutions délétères (par exemple, à Los Angeles, à Londres). On recueillait ces pollutions lors de leur retombée au sol, soit sous forme sèche (puis on analysait la composition chimique des aérosols), soit, le plus souvent, dans les eaux de pluies (composées d'eau liquide, d'aérosols et de gaz dissous). Ces méthodes d'estimation au sol des pollutions atmosphériques n'étaient pas nouvelles (et perdurent).[173]

Antérieurement à la création du BAPMoN, dès les années 1950, un autre réseau transnational avait en outre été créé. Cette expérience avait été entreprise en Europe, sous l'impulsion des Suédois, avec la prétention de quadriller une région de plusieurs milliers de km² avec des stations de mesure, afin de générer des cartes de pollution régionale, et avec l'ambition de modéliser le trajet desdits polluants sur de longues distances, à l'aide de modèles numériques. Elle trouvait son origine dans les travaux de Hans Egnér et son jeune assistant Erik Eriksson, qui s'intéressaient à la présence d'ammonium et de soufre dans les sols et les eaux de pluies. Dans un premier temps, l'objectif contemplé avait été la réalisation d'études des sols utiles à l'agriculture. E. Eriksson était agronome de formation. Entre 1945 et 1953, il était passé par le Département de Chimie agricole de la Faculté royale d'Agriculture d'Uppsala, par l'Institut de Science des sols suédois, par le 'Macaulay Institute for Soil Research' d'Aberdeen en Ecosse, avant de revenir travailler en Suède avec H. Egnér, sous la direction duquel il avait déjà travaillé. Mais, en 1953, la rencontre de H. Egnér et E. Eriksson avec l'éminent météorologiste Carl-Gustaf Rossby, de retour pour quelques jours d'Outre-Atlantique, allait faire muter les objectifs de leur collecte des eaux de pluies, initiée quelques années plus tôt. [Eriksson, 1998]

Quarante-cinq années plus tard, E. Eriksson se demandait encore quelle raison avait le plus motivé C.-G. Rossby à stimuler le développement d'un réseau régionale d'analyse des eaux de pluies en Europe du nord. Etait-ce pour étudier le transport atmosphérique à grande échelle ?, pour comprendre le rôle des substances chimiques dans la formation de la pluie et de la neige ?, pour maîtriser cette formation grâce à des technologies d'ingénierie atmosphérique ?... Quoiqu'il en soit, dans les trois cas, conclurait E. Eriksson, « la seule manière de s'en sortir était d'étudier la composition atmosphérique et apprendre de la Nature elle-même. » Suivant la suggestion de Rossby, une Section sur la composition atmosphérique fut alors rapidement créée au sein du Département de météorologie de l'Université de Stockholm (plus connu sous l'acronyme « MISU »), qu'Eriksson intégra, avec pour mission de monter avec H. Egnér un réseau européen, l''European Atmospheric

[173] Précisons que des avions sont également utilisés dès les années 1970 dans le cadre de l'expertise sur les pluies acides, principalement afin d'effectuer des relevés de soufre dans l'atmosphère. [Ottar, 1976]

Chemistry Network' (EACN). L'appui que fournit alors Rossby fut d'un caractère primordial, lui « qui connaissait presque tous les preneurs de décision de la météorologie », qu'il mit autour d'une table afin que soient choisis les sites des stations, les équipements d'échantillonnage, les procédures, et les méthodes et centres des analyses physico-chimiques, relatera E. Eriksson. [Eriksson, 1998][174]

Dans les mois qui suivent ces conciliabules, H. Egnér et E. Eriksson soumettent à publication de premiers résultats dans le grand journal international *Tellus*, à partir des mesures des premières stations de l'EACN (Emanuelsson A., E. Eriksson & H. Egnér, 1954, "Composition of Atmospheric Precipitation in Sweden" ; Egnér. H. & E. Eriksson, 1955, "Current data on the chemical composition of air and precipitation"). Viennent se greffer à leur projet plusieurs scandinaves et Européens, dont Carl Junge, de retour des Amériques. En 1963, C. Junge et E. de Bary publient ainsi une synthèse des cinq dernières années de recueil de données. Ils y cartographient « la distribution du soufre et du chlore en Europe ». Ils relèvent un excès d'ions sulfates dans les précipitations dans pas moins de 82 stations, à la fois en hiver et en été… Un excès qui pourrait être dû à quelque émission importante de SO_2 dans l'atmosphère quelque part en Europe. [Popovics *et al.*, 1987, p. 48]

Entre temps, les mesures se sont en outre intensifiées en Scandinavie. Si E. Eriksson est peu présent en Suède entre 1955 et 1963 (et réalise même avec Bert Bolin, élu en 1957 à la tête de l''International Meteorological Institute' (créé à Stockholm en 1955 par Rossby), des travaux fondateurs sur les échanges de carbone entre atmosphère et océans)[175], d'autres se

[174] Dans une interview datée de 1998, E. Eriksson explique :

"In 1953, Rossby was acquainting himself with the state of atmospheric sciences in Uppsala when he visited Prof. Egnér in Ultuna. This was the time of rainmaking; H. Kohler, professor of meteorology at the University of Uppsala, was well known for his work on condensation and nucleation processes in the atmosphere, part of which bordered on geochemistry. The atmospheric chemistry work at Ultuna was also known by chemists. The study of atmospheric large-scale transport processes with chemistry as a tracer might have entered Rossby's thoughts or, alternatively, the possibility of understanding the role of chemical substances in rain and snow formation and even to manipulate this process. On the whole, however, the range of possibilities at that time must have been somewhat hazy; the only way out was to study atmospheric chemistry and learn from Nature itself. Rossby introduced an atmospheric chemistry section at MISU and, on Egner's recommendation, asked me to organize and run it. I hesitated, because I understood that this would most likely end my career in soil science. However, I accepted and took two years leave from Ultuna." [Eriksson, 1998]

[175] Eriksson participe notamment au lancement d'un autre réseau international impliquant l'OMM, 'The Global Network of Isotopes in Precipitation' (GNIP), initié en 1958 avec l'IAEA ('International Atomic Energy Agency' ; 1957-…). Ce réseau IAEA/WMO portant sur les composés que nous appelons aujourd'hui les « isotopes environnementaux » devint opérationnel en 1961, et perdure aujourd'hui. Initialement conçu pour surveiller les retombées d'un isotope de l'hydrogène, le tritium, subséquentes aux tests atmosphériques thermonucléaires, la vocation du réseau évoluera dans les années 1970 vers l'observation des isotopes stables d'hydrogène et d'oxygène pour des études plus interdisciplinaires et "environnementalistes". Avec quatre objectifs principaux, est-il indiqué sur le site Internet de l'IAEA : la modélisation de la circulation globale de l'atmosphère ; l'étude des climats régionaux et globaux ; les échanges d'eau entre atmosphère et biosphère ; le repérage de nourriture et de plantes, le suivi géographique des espèces migratoires (oiseaux, poissons, papillons, *etc.*), ou encore des expertises médico-légales. Ajoutons que Dieter Ehhalt, l'un des premiers chimistes de l'atmosphère à avoir activement participé au programme d'élaboration des cycles biogéochimiques (voir Chapitre 6) a produit, en 1974, un rapport pour le NCAR sur les isotopes de l'hydrogène dans la troposphère. L'essentiel de ses sources provenait de travaux publiés par l'IAEA entre 1967 et 1970. [Eriksson, 1998 ; *Site web de l'IAEA*, 2014, http://www-

chargent d'effectuer les relevés de mesures et de les analyser. Ainsi, Svante Odén (1924-1986), auquel Eriksson a confié en son absence les clefs du programme sur la composition atmosphérique au MISU. S. Odén, qui est comme Eriksson un agronome de formation (il a durablement enseigné la science des sols et la chimie de l'écologie à l'Université suédoise des sciences agricoles), prend ce travail à cœur. Il rassemble les données de concentrations chimiques dans les précipitations recueillies dans les stations de l'EACN, et les cartographie. Or, il est frappé par la significative augmentation des dépôts de soufre d'une année à l'autre (qui coïncide avec une baisse du pH dans les précipitations). Il analyse également les nombreuses données qui se sont accumulées depuis quelques années au sujet de l'acidification des lacs, en particulier dans le sud-ouest de la Suède, et cherche à les corréler avec des données relatives à la pêcherie lacustre [Eriksson, 1998]. Il naîtra de ce travail le retentissant article publié le 24 octobre 1967 dans le quotidien suédois *Dagens Nyheter*, qui a fait reconnaître S. Odén comme le premier lanceur d'une alerte publique sur les pluies acides. Dans son article, il suspecte l'acidification des eaux de surface en Suède d'être corrélée à des émissions de polluants atmosphériques venues de Grande-Bretagne et d'Europe centrale. Le Conseil de Recherche Scientifique suédois publiera l'année suivante une contribution d'Odén sur « l'acidification des précipitations et ses conséquences sur l'environnement », dans son premier *Bulletin de la Communauté d'Ecologie*.

Le pendant nord-(est-)américain à l'alerte de S. Odén, c'est-à-dire la médiatisation des pluies acides Outre-Atlantique, viendra peu après, en 1969, avec le lien établi par des chercheurs du gouvernement canadien entre des émissions de soufre provenant de fonderies et des acidifications lacustres et des baisses de population de poissons. En 1972, de l'autre côté de la frontière nord-américaine, l'Etats-Unien G.E. Likens discutera la distribution régionale des précipitations acides et leurs effets, en Amérique du nord. Mais, la médiatisation de la problématique des pluies acides décollera aux Etats-Unis seulement en 1976, avec la publication dans *Science* d'un article sur « les précipitations acides dans le Nord-est des Etats-Unis », signé J.N. Galloway, G.E. Likens et E.S. Edgerton (Galloway *et al.*, 1976), et du rapport, rédigé pour l'Etat de New York par Carl L. Schofield, sur le déclin des populations de truites dans le massif des Adirondacks (dans l'est des Etats-Unis), déclin potentiellement lié à l'acidification des lacs par des pluies acides (Schofield, 1976(1), "Acidification of

naweb.iaea.org/napc/ih/IHS_resources_gnip.html (05/09/2014) ; Ehhalt, 1974, *Vertical profiles of HTO, HDO and H2O in the troposphere*, p. 8]

Quant aux travaux spécifiques réalisés par les compatriotes E. Eriksson et B. Bolin, ceux publiés en 1958, notamment, ils prolongeaient les travaux publiés un an plus tôt par Roger Revelle et Hans Suess dans *Tellus*. Bolin et Eriksson utilisaient un modèle d'interaction atmosphère-océans à court-terme, qui prédisait que le CO_2 atmosphérique avait de fortes chances d'augmenter de 25 pourcent d'ici à la fin du siècle, et ceci avec les émissions humaines comme principale origine [Bolin & Eriksson, 1958 **in** Howe, 2014, p. 35].

Adirondack lakes by atmospheric precipitation: extent and magnitude of the problem"). Au cours de la même année 1976, le chercheur du 'Departement of Natural Resources' de la 'Cornell University' divulgue également ses résultats dans la revue suédoise *Ambio* (Schofield, 1976 (2), "Acid precipitation: effects on fish"), alors que, dans le même temps, au Canada, Schindler et d'autres chercheurs entreprennent de premières expérimentations d'additions d'acide dans des lacs artificiels, dans la Province de l'Ontario (de semblables expérimentations seront réalisées ailleurs sur des forêts "artificielles")… Aussi, bien que, par exemple, C.L. Schofield eût déjà publié un "Water quality in relation to survival of brook trout" onze an plus tôt (1965) dans les *Transactions of the American Fisheries Society*, ou que le limnologiste Eville Gorham et ses collègues états-uniens eussent entamé la même démarche de corrélation entre transport atmosphérique du SO_2 et acidification des milieux aquatiques dès 1955, la controverse sociotechnique sur les pluies acides aux Etats-Unis n'est véritablement lancée qu'au milieu des années 1970. [Bricker & Rice, 1993, pp. 152 & 172]

En Europe, par contre, les médias se sont emparés des effrayantes « pluies acides » dès le début des années 1970. Et avec eux, les pouvoirs politiques. E. Eriksson affirmera que le « message » d'alerte d'Odén était bien passé auprès « des « verts » et des politiciens », et ceci rapidement. Mais, avant de rejoindre la table des négociations, ces derniers vont d'abord répondre par la mise en place de nouveaux réseaux devant succéder au "trop restreint" EACN. Ceux-ci vont, comme l'EACN, se donner comme tâche principale de mesurer les concentrations de SO_2 dans de multiples stations, et dans les lacs et les rivières ("reste ensuite à" simuler les transports possibles du soufre dans l'atmosphère à l'aide de modèles numériques météorologiques)[176]. Le SO_2 est en effet alors jugé comme la cause principale des

[176] Le MISU participa activement à l'élaboration de ces modèles numériques. E. Eriksson affirmera que, uniquement « à l'aide d'un modèle assez simple de dynamique atmosphérique pour une région particulière, et quelques connaissances empiriques sur le taux de retrait du soufre de l'atmosphère, la distribution des taux de dépôts au sol pouvaient être calculée » – et, donc, réciproquement, l'origine des pollutions acides, déterminée [Eriksson, 1998]. En vérité, la tâche n'était bien sûr pas aussi simple. Elle généra une importante littérature de part et d'autre de l'Atlantique au cours des années 1970-80.

Dans la mesure où les principaux enjeux de modélisation des pluies acides se trouvent dans la simulation de la dynamique des masses d'air, et non les interactions chimiques dans l'atmosphère, nous ne développerons pas ce point modélisation numérique au sujet de l'affaire des pluies acides. Nous renvoyons notamment au travail d'Hubert Kieken sur le modèle d'évaluation intégré RAINS (Regional Air pollution INformation and Simulation) de l'IIASA ('International Institute for Applied Systems Analysis' ; Autriche). Développé à partir de 1983, RAINS est le modèle-phare du Programme EMEP (European Monitoring and Evaluation Programme ; créé en 1977) – « modèle-phare » car il s'agit de son modèle dit « intégré », *i.e.* travaillant avec des scénarios d'émissions projetées dans le futur, et non d'un "simple" modèle physico-chimique de l'EMEP, tels que les modèles *EMEP/MSC-E* ou *EMEP/MSC-W*. RAINS, qui a peu évolué depuis sa version de 1984, a joué un rôle important dans les négociations internationales sur les pollutions atmosphériques (pollution de l'air urbain, et surtout pluies acides) en Europe [Kieken, 2004, pp. 379-382]. Ceci ne signifie pas que la plupart des pays européens n'ont pas développé des modèles propres (ainsi, par exemple, le modèle HARM ('Hull Acid Rain Model') au Royaume-Uni [Metcalfe *et al.*, 2001]). En outre, parallèlement, se développaient outre-Atlantique des modèles, certains en lien direct avec le 'National Acid Precipitation Assessment Program' états-unien (NAPAP ; créé en 1980). Par exemple, le modèle MAGIC ('Model for Acidification of Groundwater In Catchments'), qui fut développé à partir de 1985 [Winstanley *et al.*, 1998].

pluies acides ; et, de plus, comme la cause de la plupart des smogs en Europe. [Eriksson, 1998]

Sur le Vieux continent, un nouveau programme de mesures en réseau est donc entrepris à partir des années 1970, afin d'estimer les trajectoires atmosphériques du dioxyde de soufre (et notamment, pour commencer, afin de confirmer ou d'infirmer les trajectoires suspectées entre les bassins industriels de Grande-Bretagne et la Scandinavie). Le programme de mesure à l'aide du réseau EACN a montré la voie. L'EACN, écrivent en 1973 deux météorologistes anglais de l''Air Pollution Research Group' du 'Department of Mathematics' de l''Imperial College' de Londres, Richard Segar Scorer et M.P. Paterson, « est un système de données de première qualité » et l'un des plus exhaustifs (dix-neuf propriétés de l'air et des précipitations sont déterminées chaque mois dans chacune de ses stations). Toutefois, insistent-ils, l'heure est venue d'entreprendre « un programme continu de contrôle de la qualité » des échantillons de précipitation de l'EACN. Pour cela, ils pointent du doigt trois types d'« erreurs » dans les données de l'EACN. Et, ils font remarquer qu'E. Eriksson a déjà offert en 1970 une contribution à la résolution de l'un des trois types d'erreurs (en appelant à ce que soit mieux spécifié quelle période tel échantillon couvrait), dans la Note technique n° 106 de l'OMM (*Cf.* Eriksson E., 1970, "The importance of investigating global background pollution", *W.M.O. Technical Note 106: Meteorological Aspects of Air Pollution*). [Paterson & Scorer, 1973, pp. 1163-1170][177]

L'article de Scorer et Paterson est de circonstance. Il s'inscrit dans le contexte de réflexion pour la mise en place de nouveaux réseaux devant intégrer et dépasser l'EACN. Quelques années après le message d'alerte d'Odén, deux nouvelles « périodes de surveillance du soufre atmosphérique en Europe » vont ainsi succéder à l'EACN (tout en tentant de l'intégrer). Elles ont été décrites par Maria Popovics, Dezso Szepesi et Charle Hakkarinen. L'une se déroule en 1973-74 sous les auspices de l'OCDE, qui a établi en 1972 un Programme de coopération technique pour la Mesure du transport à longue distance des polluants de l'air. Le lieu des nouvelles stations est choisi afin d'agrandir la couverture géographique du réseau, et de couvrir plus densément les régions dans des pays qui subissaient 'a priori' peu d'émissions locales. Une fois par mois, elles font un rapport à l'Unité centrale de coordination de l'OCDE (qui porte principalement sur le SO_2). [Popovics *et al.*, 1987, p. 49]

[177] Dans son pamphlet de 1977, Scorer utilisera l'exemple des pluies acides en guise de démonstration des limites de nos sciences (voir Sous-chapitre 5.3). Il écrira :

> « Si [une] analyse chimique [des eaux de pluie] peut être erronée mais crue [pendant des années (dix-sept ans, pour l'exemple pris par Scorer des eaux de pluie recueillies dans le nord-ouest de l'Europe)], sommes-nous sages de croire une masse d'autres statistiques qui sont collectées et utilisées comme bases à des théories et à des décisions [politiques] ? [Scorer, 1977 (1), p. 150]

Quant à la troisième et dernière période, il s'agit de celle de l'implantation de nombreuses stations dans le cadre du Programme EMEP ('European Monitoring and Evaluation Programme'), sous les auspices de l''United Nations Economic Commission for Europe' (UN-ECE) – et avec l'assistance de l'OMM et de l'UNEP. Le programme EMEP voit le jour en 1977. Son centre de coordination, le 'Chemical Coordinating Centre', est implanté au 'Norwegian Institute for Air Research'. D'une durée de cinq ans (1978-82), la première phase d'EMEP centralise les données quotidiennes de concentration de SO_2 et d'ions sulfate, pour 80 stations réparties à travers l'Europe centrale et septentrionale. Son rapport final, publié en 1984 (*EMEP-CCC*, 1984), souligne que les diverses méthodes d'analyse chimique employées dans les différentes stations donnent globalement des résultats plus fiables que par le passé, mais admet aussi que les intercomparaisons effectuées entre méthodes d'analyse suggèrent qu'une réduction du nombre de méthodes chimiques au sein du programme (notamment, une homogénéisation entre pays), serait la bienvenue afin de réduire les incertitudes. [Popovics *et al.*, 1987, pp. 49-50]

Par ailleurs, en 1979, 1980 et 1981, l'OMM avait ajouté quelques mesures BAPMoN (réseau créé, rappelons-le, en 1969, et avec son centre de stockage des données situé aux Etats-Unis), afin de compléter encore un peu plus la toile formée par les trois principaux programmes de mesure du SO_2 que nous venons d'introduire (EACN, OCDE et EMEP). La distribution géographique de ces stations européennes est représentée sur la Figure 23 ci-dessous. Précisons que, outre la diversité des instruments et méthodes chimiques, cette répartition géographique inégale posait en elle-même des problèmes pour modéliser les trajets du soufre dans l'atmosphère et son dépôt (de même que, enfin, le fait que les stations fussent situées à des altitudes variables, parfois au-dessus de 1000 mètres).[178] [Popovics *et al.*, 1987, p. 50].

[178] Sur les manières de corriger ces problématiques, et par conséquent d'établir des distributions spatiales et temporelles du soufre dans l'air, nous renvoyons à Popovics *et al.*, 1987, pp. 50-57.

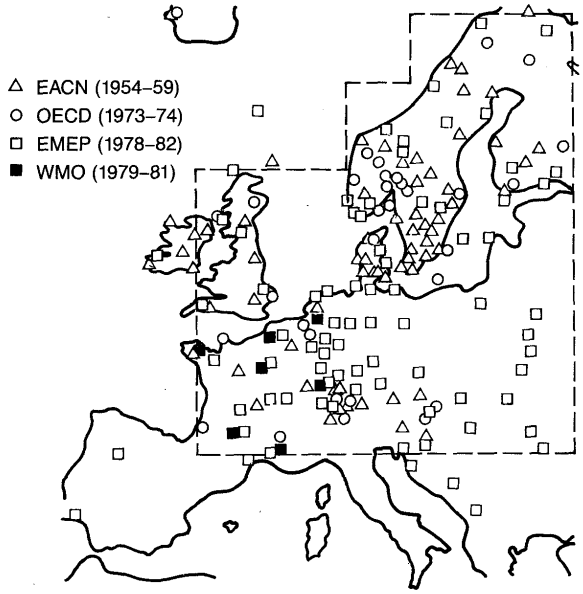


Figure 23 : Principaux réseaux européens de surveillance de la pollution atmosphérique de fond, et en particulier des concentrations de SO_2 dans les eaux de pluies, entre 1954 et le début des années 1980 [Popovics *et al*., 1987, "Fig. 1. Networks of different monitoring programs of background pollution", p. 48]

Du dioxyde de soufre à la pollution de fond et aux cycles biogéochimiques

Pour en revenir au BAPMoN en particulier, ce réseau onusien ne se limite bien sûr pas à l'Europe. Entre son lancement en 1968-69 et 1985, il est passé de vingt stations à presque deux cents réparties sur le globe (voir Figure 24 (a) ci-dessous) – même si, en définitive, le traitement de données au Centre BAPMoN pour les années avant 1984 se limitera aux mesures de moins d'un tiers des stations existantes. En outre, comme son nom l'indique, le 'Background Air Pollution Monitoring Network' est un réseau de surveillance de la « pollution de l'air de fond » au sens large, au sens de réseau de surveillance de la « pollution atmosphérique ». Ses activités d'analyse de données ne portent pas en priorité sur les mesures de précurseurs des pluies acides (les composés soufrés, les oxydes d'azote, l'ammoniac, les composés organiques volatiles), comme le font l'EMEP en Europe – ou, parallèlement, aux Etats-Unis, le réseau de stations du NADP ('National Acidic Deposition Program' ; 1977-80), puis l'élargi 'National Trends Network' (NTN) du NAPAP ('National Acidic Precipitation Assessment Program' ; 1980-…).[179] Elles se donnaient plus généralement

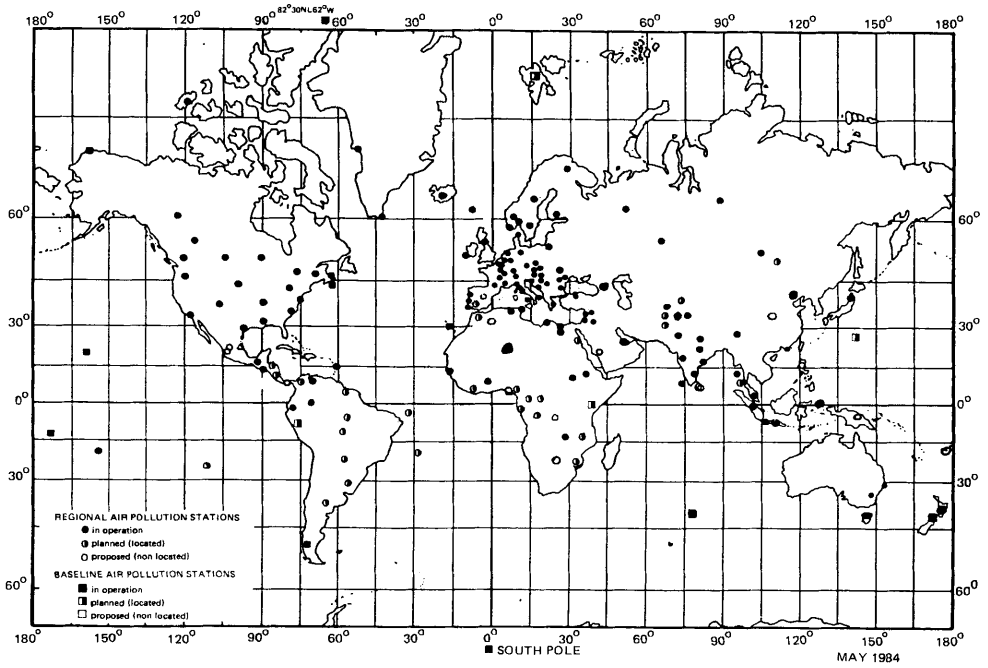
[179] En tout cas, était-ce la situation jusque dans les années 1990. Car, en fait, aujourd'hui, l'EMEP, et les programmes de mesure semblables en Amérique du nord et ailleurs dans cératines régions du monde, fournissent des données multi-polluants, comprenant le SO_2 et les NO_x (dont le NO2), mais aussi les particules solides (PM), l'ozone (troposphérique), le formaldéhyde, les métaux lourds (mercure, plomb, cadmium), les composés organiques volatils (COV) ou encore les polluants organiques persistants (POP), issus soit de l'industrie chimique et souvent reconnus comme perturbateurs endocriniens (pesticides, polychlorobiphényles (PCB), *etc.*), soit de la combustion du bois ou d'ordures ménagères (hydrocarbures aromatiques polycycliques (HAP), dioxines, furanes, *etc.*)… Bref, des pollutions qui ne contribuent pas toutes à l'acidité / alcalinité des pluies, des milieux aqueux, des sols.

Précisons par ailleurs que le SO_2, les PM, les NO_x et les COV avaient déjà parfois été mesurés de manière systématique dès l'immédiat après-guerre, dans une perspective locale, lors des épisodes de smog soufré (Donora en

pour tâche la détermination de quantités de polluants gazeux et solides recueillis dans les précipitations, d'aérosols dans les dépôts secs… ou encore des concentrations de dioxyde de carbone atmosphérique. En témoigne le logo du GAW ('Global Atmosphere Watch'), réseau né de la fusion en 1989 du réseau de mesure d'ozone GO3OS et du BAPMoN, devenant subséquemment le réseau de surveillance de l'OMM possédant la plus grande valeur aux yeux des chimistes de l'atmosphère (voir Figure 24 (b) ci-dessous).[180]

Pennsylvanie, 1948 ; Londres, 1952 et 1962) et de smog photochimique (à Los Angeles, notamment). Au XX^{ème} siècle, l'épisode le plus grave de pollution contenant de l'acide sulfurique (provenant d'émissions de SO_2) fut sans nul doute le 'Great smog' de Londres de 1952. Certes, des polluants autres que le SO_2 transformé en acide sulfurique dans l'atmosphère contribuèrent à la formation de ce smog, qui résultait principalement de combustions intenses de charbon dans des conditions météorologiques propices à la formation d'un brouillard épais. Toutefois, explique Mark Jacobson, l'auteur de plusieurs manuels sur les pollutions atmosphériques et la modélisation de l'atmosphère, l'acidification du smog aurait bel et bien été la principale cause des quelques 2000 à 4000 décès répertoriés (selon les sources). [Köhler, 1988 pp. 254-257 ; *WMO/GAW*, 2000 ; Tørseth *et al.*, 20, pp. 5450 ; Jacobson, 2002, p. 263]

[180] En 2014, les autres programmes de l'OMM étaient les suivants : 'World Weather Research Programme', 'Hydrology and Water Resources Programme', 'Marine Meteorology and Oceanography Programme', 'WMO Quality Management Framework', 'Tropical Cyclone Programme', 'Public Weather Services Programme', 'Agricultural Meteorology Programme', 'WMO Space Programme', 'Aeronautical Meteorology Programme', 'World Climate Research Programme', 'Information and Public Affairs Programme', 'Voluntary Cooperation Programme', 'Education and Training Programme', 'WMO Programme for the Least Developed Countries', 'Regional Programme', 'Disaster Risk Reduction Programme', ainsi que le 'World Climate Programme' (WCRP), focalisé sur les changements climatiques, et dont le précurseur est le 'Global Atmospheric Research Program' (GARP ; 1966-1979))… et, bien sûr, le 'World Weather Watch Programme', qui demeure le fleuron de l'OMM, notamment grâce à ces fameux et impressionnants 'Global Observing System' (GOS), 'Global Telecommunication System' (GTS) et 'Global Data-processing and Forecasting System' (GDPFS). Voir le site Internet de l'OMM : *WMO*, 2014, http://www.wmo.int/pages/summary/progs_struct_en.html (02/09/2014)



(a)

(b)

Figure 24 : (a) Répartition des stations BAPMoN en 1984, et (b) logo initial du GAW, qui réunit depuis 1989 le BAPMoN et le GO3OS
[Köhler, 1988, p. 255; *WMO GAW*, 2000, « couverture »]

Nous voulions exposer deux points relatifs à l'expansion des réseaux de mesure de la pollution de fond dans le monde. Le premier est lié à *la contribution des programmes sur les pluies acides à des programmes sur la dispersion des pollutions industrielles à grande échelle et sur les*

cycles biogéochimiques (remarque : la réciproque est vraie). Si l'internationalisation des réseaux de mesure du SO_2 et des NO_x a été, comme nous venons de le montrer, stimulée en partie par les alertes sur les pluies acides à la fin des années 1960 et dans les années 1970, elle va également contribuer à un projet de détermination plus fine de la composition de l'atmosphère, des plus précieux pour les chimistes de l'atmosphère.

En 1988, c'est-à-dire à la veille de la fusion du GO3OS et du BAPMoN dans le GAW, le météorologiste ouest-allemand A. Köhler, un ancien de l'OMM, décrit la stratégie de l'OMM en matière de recherche et surveillance des pollutions de l'environnement – hors changement climatique (pour lequel Bert Bolin et des collègues ont créé le WCRP ('World Climate Research Programme' ; OMM ; 1979) et hors destruction de l'ozone – comme reposant sur « trois projets principaux » en cours. Un premier concerne « *la dispersion des polluants de l'air dans toutes les échelles de temps et d'espace* ». Il « inclut notamment la météorologie des pollutions de l'air dans des régions hautement polluées », et « les flux transfrontières de pollution de l'air ». Avec, dans ce second cas, l'EMEP comme programme de référence en Europe, auquel contribue l'OMM, aux côtés de l''United Nations Economic Commission for Europe' (UN-ECE) et de l'UNEP. [Köhler, 1988, pp. 254-256]

Un second programme porte sur « *la surveillance de la pollution atmosphérique de fond* », qui cherche à mesurer la concentration d'un grand nombre de composés atmosphériques dans un maximum de régions du monde. BAPMoN en est le principal contributeur [Köhler, 1988, p. 254]. Comme nous le verrons dans les Chapitres 8 et 9, cette pollution atmosphérique "de fond" prendra une importance nouvelle à partir des années 1990, avec les travaux sur le transport transcontinental voire hémisphérique des NO_x et la pollution de fond globale à l'ozone, qui seraient en passe de devenir des facteurs importants de la toxicité de l'air et du réchauffement climatique.

Le troisième et dernier projet signalé par Köhler « s'intéresse aux *interactions de la pollution de l'air avec d'autres média, en particulier l'eau et les sols* » ; en d'autres termes, il prend en compte « l'abondance et le devenir des polluants atmosphériques pour la part de leurs cycles de vie pendant lesquels ils ne sont pas en suspension et mouvement dans l'atmosphère ». « Cette philosophie est parfaitement connue des scientifiques », écrit Köhler [Köhler, 1988, p. 256] En effet, n'avait-elle été pas le fondement de la science moderne des écologues depuis plusieurs décennies ? Et, à l'échelle globale, le fondement de la science du système Terre que l'on voyait émerger dans les années 1980 ?

Cette science du système Terre repose en partie sur les cycles bio-géo-*atmo*-…-chimiques globaux (puisqu'il faudrait, en fait, les nommer ainsi ! – voir notre Chapitre 6). Or, les études à grande échelle sur les cycles biogéochimiques ont été partiellement motivées par les pluies acides, et ceci à deux égards :

- d'une part, par le biais de travaux comparant les apports naturels et anthropiques du SO_2 et des NO_x à grande échelle. Leurs auteurs, des atmosphériciens s'intéressant précocement aux cycles biogéochimiques globaux (Richard Cadle, Paul Crutzen), devaient en effet identifier quels étaient les principaux puits de ces substances au sol et dans l'atmosphère. Ainsi, les articles suivants contribuent-ils à la fois à la littérature sur les pluies acides et les cycles biogéochimiques globaux du soufre et l'azote : Albritton Daniel, S.C. Liu & D. Kley, 1984, "Global nitrate deposition from lighting"; Cadle Richard, 1980, "A comparison of volcanic with other fluxes of atmospheric trace gases"; Logan Jennifer, 1983, "Nitrogen oxides in the troposphere: global and regional budgets"; Rodhe Henning, Paul Crutzen, A. Vanderpol, 1981, "Formation of sulphuric and nitric acid in the atmosphere during long range transport" (Rodhe *et al.*, 1981)) ;
- d'autre part, l'expertise sur les pluies acides nécessite d'inspecter les retombées de composés basiques (calcium, magnésium et potassium), qui avaient un effet sur le pH des sols et des eaux inverse au SO_2, aux NO_x et à l'ammoniac (NH_3).[181] [Bricker & Rice, 1993, pp. 171-173 ; Hedin & Likens, 1996, p. 91]

… Néanmoins, constatait A. Köhler en 1988, « beaucoup restait encore à faire avant qu'un réseau intégré, global et routinier, de surveillance de la pollution de fond puisse devenir opérationnel ». Et ainsi nous en dire plus sur « les interactions entre pollution de l'air, écosystèmes et biosphère » (voir Figure 25 ci-dessous). [Köhler, 1988, pp. 254-256 & 267]

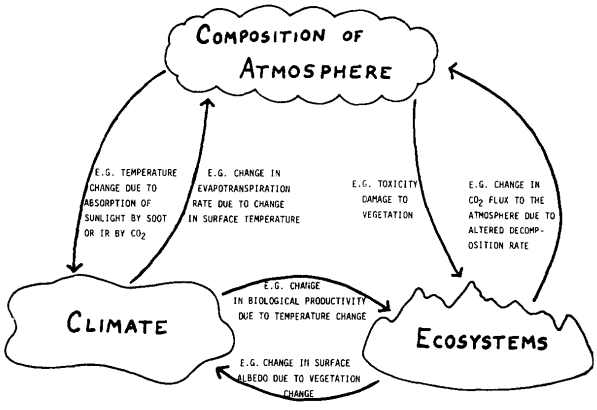


Figure 25 : Représentation schématique des liens entre la composition de l'atmosphère (et, avec elle, la qualité de l'air), les paramètres climatiques et les écosystèmes, tels que proposée par le

[181] Par exemple, dans un article de synthèse de 1996, Lars Hedin et Gene Likens écrivent que la publication de rapports récents les a amenés à se demander si certains sols ne souffraient pas d'un excès d'acidité, non seulement à cause d'une exposition continue aux pluies acides, mais également parce qu'ils ne recevaient plus suffisamment de cations basiques de l'atmosphère. Les scientifiques ont en effet observé une chute des niveaux de substances nutritives pour les sols, telles que le calcium, magnésium et potassium dans les sols forestiers à travers le monde, rapportent Hedin et Likens. Probablement, suggèrent-ils, des suites de modifications de diverses pratiques industrielles et agricoles. [Bricker & Rice, 1993, pp. 171-173 ; Hedin & Likens, 1996, p. 91]

Professeur John Harte de l'Université de Berkeley, lors de l''International Symposium on Arctic Air Pollution' qui se tint en septembre 1985 à Cambridge au Royaume-Uni.
Remarque « 'IR' » signifie « infrarouge », et « l'absorption […] de l'IR par le CO_2 » désigne l'effet de serre du CO_2
[Harte, 1985 **in** Köhler, 1988, « Figure 9 », p. 267]

Toutefois, des interconnexions plus riches vont se créer par la suite, à partir des années 1990, au fil des créations de nouveaux programmes sur la science du système Terre. Premier exemple : dans le Bulletin OMM de janvier 2010, un article est consacré à « l'histoire de la contribution du GAW dans le contrôle du climat » [Dlugokencky *et al.*, 2010]. Deuxième exemple : le GAW se décline aujourd'hui en neuf groupes, responsables des mesures relatives aux « aérosols », aux « gaz à effet de serre », aux « gaz radioactifs », à la « météorologie et l'environnement urbain », aux « précipitations », à l'« ozone stratosphérique », aux « radiations UV », à la chimie des océans en lien avec l'atmosphère, aux risques dus aux « tempêtes de poussière et de sable ». [*WMO's website*, 2012, http://www.wmo.int/pages/prog/arep/gaw/gaw_home_en.html (05/01/2012)]

Ce dernier programme est commun au GAW et au 'World Weather Research Programme' (WWRP), un autre programme de l'OMM, qui se donne pour objectif d'augmenter « la capacité de la société à surmonter les impacts les plus dangereux du temps, à travers l'amélioration de la précision, du temps de production et de l'utilisation des prévisions météorologiques » [*WMO's website*, 2012, http://www.wmo.int/pages/prog/arep/wwrp/new/wwrp_new_en.html (le 05/01/2012)]. Ceci nous amène à développer notre second point : la *pluralité institutionnelle* des mesures en réseau de composés atmosphériques à l'échelle mondiale.

Ainsi, pour commencer, en contrepoint du triptyque de l'OMM sur la surveillance et la recherche sur la pollution environnementale (hors changement climatique et destruction de la couche d'ozone) que décrit A. Köhler – programme qui, dans les années 1980, est parfois nommé à l'OMM 'Environmental Pollution Monitoring and Research Programme' –, se sont développés des programmes semblables sous la direction de l'ICSU. En 1957, dans un contexte de tests nucléaires atmosphériques répétés, une 'Commission on Atmospheric Chemistry and Radioactivity' avait été fondée par l'ICSU. En 1971, alors que les essais nucléaires atmosphériques états-uniens et soviétiques ont officiellement cessé (en 1962), la commission est rebaptisée iCACGP ('international Commission on Atmospheric Chemistry and Global Pollution' ; ou, plus simplement CACGP). L'iCACGP co-organisera ensuite un projet international de recherche des plus appréciés par les chimistes de l'atmosphère : l'IGAC ('International Global Atmospheric Chemistry' ; 1990-…), co-organisé avec l'IGBP

(International Geosphere-Biosphere Programme), un programme lancé en 1987 sous l'impulsion de Bert Bolin, de nouveau, mais aussi du chimiste de l'atmosphère Paul Crutzen, pour ne citer qu'eux.[182] L'IGBP est, comme l'IGAC et l'iCACGP, largement à la charge de l'ICSU. Mais des liens forts lient l'iCACGP et les programmes de l'ONU, et en particulier de l'OMM (voir *Site de l'iCACGP*, 2014, http://cacgp.chemistry.uoc.gr/CACGP_poster_f.pdf (05/09/2014)). Depuis les années 1990, l'iCACGP, dont l'IGAC, a contribué de manière croissante à l'expertise du GIEC sur le changement climatique.

Outre ces projets de l'ICSU, signalons par ailleurs la première initiative semblable au BAPMoN émanant de l'onusienne UNEP (United Nations Environment Programme). Créée en 1972 au lendemain de l'UNCHE de Stockholm, l'UNEP initia trois ans plus tard un 'Global Environment Monitoring System' (GEMS). De part la vocation de protecteur de l'environnement mondial que lui a conférée l'UNCHE, l'UNEP imagine son système de surveillance comme « un effort collectif de la communauté mondiale pour acquérir l'information nécessaire pour étudier les processus environnementaux en les surveillant, et ainsi comprendre et gérer l'environnement et empêcher sa dégradation » (comme le résume M.D. Gwynne, de l'UNEP, en 1988). Quel est le rôle du 'Programme Activity Centre' du GEMS, basé dans les quartiers généraux de l'UNEP à Nairobi ? « Coordonner les activités disparates de surveillance internationales qui sont conduites à travers le monde, en particulier au sein du système des Nations unies, et conseiller le Fonds pour l'environnemental ('Environment Fund') de l'UNEP sur la meilleure manière de financer et stimuler des activités nouvelles ou en cours. » Parmi les 22 réseaux que l'UNEP souhaiterait rapprocher à l'aide de GEMS, se trouvent le 'World Glacier Inventory' (UNESCO/OMM), diverses activités de conservation confiées au 'Conservation Monitoring Centre' de l'IUCN ('International Union for Conservation of Nature')… mais aussi l'EMEP (bien que ce dernier soit focalisé sur l'Europe), ainsi que le BAPMoN. « Avec ce dernier, écrit Gwynne, il s'agit par exemple « de travailler avec l'ECE ('UN Economic Commission for Europe') sur le développement de méthodes d'enquête adéquates pour déterminer le type et l'extension de diverses formes de dommages que subissent les forêts à cause de dépôts acides. Cette question est de toute évidence liée à BAPMoN, qui doit alors travailler avec la FAO ('Food and Agriculture Organization') sur la surveillance et l'évaluation des forêts, et est même liée au programme de l'Unité de gestion écologique de GEMS qui inventorie et gère les ressources naturelles renouvelables des régions arides et semi-arides » [Gwynne, 1988, pp. 219-221]. Comme nous le verrons dans le Chapitre 7, le premier grand fait d'armes de

[182] Nous soulignons le fait que, dans tous ces noms de programme, 'atmospheric chemistry' signifie « composition de l'atmosphère », et non « chimie atmosphérique au sens de science des interactions chimiques dans l'atmosphère ». Toutefois, comme expliqué dans l'Introduction générale, les mesures des concentrations atmosphériques (ou « composition de l'atmosphère ») constituent évidemment une composante nodale de ladite science.

l'UNEP et de GEMS furent les bases jetées pour une expertise internationale sur l'ozone stratosphérique, à partir de 1977. Plus récemment, on a vu apparaître un 'GEMS/Air' sur la qualité de l'air, et un 'GEMS/Water' devant apporter des réponses aux questions politiques relatives à l'eau et son usage [*Site* de l'ONU, 2014, http://www.un.org/earthwatch/about/docs/unepstrx.htm#GEMS/Air (05/09/2014)].

Enfin, signalons qu'une grande partie des programmes de surveillance de l'atmosphère dans le monde est aujourd'hui 'co-sponsorisée' – dans la plupart des cas, par l'OMM, et par une autre institution onusienne (UNEP, UNESCO, OMS, *etc.*) ou l'ICSU.

Dernière remarque : les pratiques de tous ces programmes ont bien sûr évolué. Internet a pris une place croissante, pour relier les scientifiques entre eux, mais aussi de plus en plus les scientifiques aux sphères profanes, notamment sur une base "citoyenne", dans une logique dite de "transparence". Autre mutation tardive : la participation de satellites à tout programme international de science du système Terre (en anglais, 'Earth system science(s)' ; ou même simplement 'Earth science(s)', volontiers d'usage aujourd'hui à la NASA) est devenue une presque-évidence à partir des années 2000.[183]

Pluies acides et relations internationales

Nous avons montré que, à partir de la fin des années 1960, les pluies acides avaient donné un coup d'éperon aux mesures de soufre atmosphérique, d'oxydes d'azote (NO_x), d'aérosols. Auparavant, ces trois types de polluants étaient déjà étudiés, mais plus localement, en lien avec la formation de smog. La montée en échelle, de locale à continentale, qu'impliquaient les pluies acides, rendait nécessaire la création de réseaux cohérents de mesure à l'échelle continentale. En outre, certains réseaux comme le BAPMoN avaient entrepris des mesures plus générales des polluants atmosphériques de fond (dont l'ozone troposphérique et le méthane dès les années 1980). Dans la mesure où la théorie des pluies acides fait intervenir des réactions chimiques très simples (en tout cas dans les années 1970-80), et que les pluies acides ne sont pas comprises par les scientifiques comme un problème environnemental « global » – mais continental –, nous ne rendrons pas compte ici des débats scientifiques à son sujet.

En outre, alors que nous étudierons la construction d'expertises dans les cas de la destruction de la couche d'ozone et du changement climatique, qui sont eux des processus « globaux » au sens où l'entendent les scientifiques, nous n'insisterons pas en revanche sur la création d'un processus d'expertise sur les pluies acides, qui va lier de manière croissante

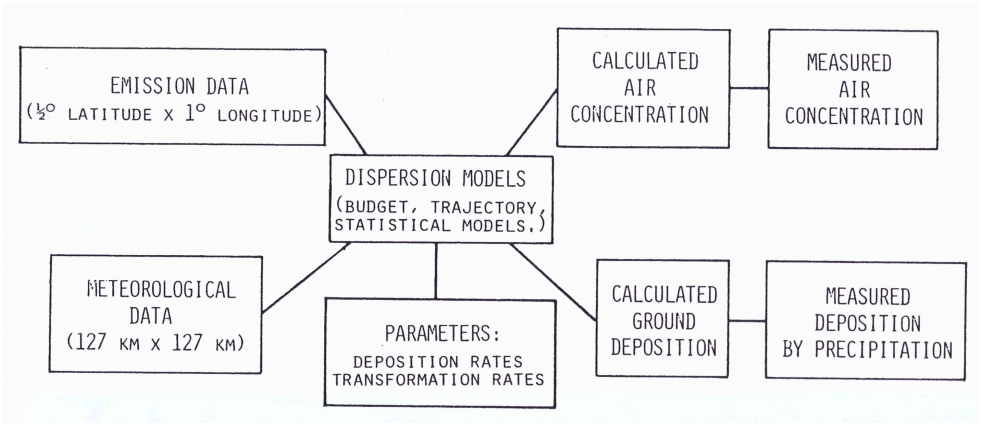
[183] Voir par exemple sur ce point la thèse de Gemma Cirac Claveras, 2014 (à paraître), EHESS / Centre A. Koyré, communication personnelle.

science et politique – notamment par le biais de modélisations numériques, d'indices environnementaux et d'analyses coût-bénéfice. Nous illustrerons ce point simplement par la Figure 26 ci-dessous, qui concerne l'Europe. Elle met en regard

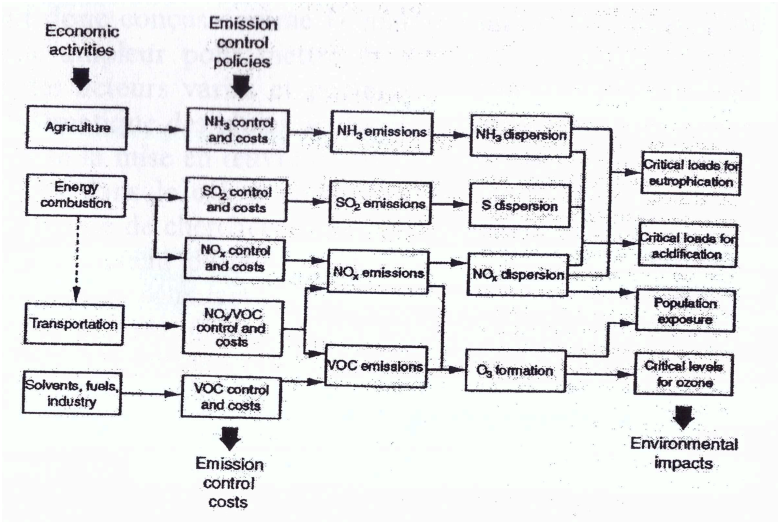
(a) un diagramme de modèle d'émission/dispersion/déposition du SO_2 daté de 1976 (soit quatre ans après les débuts du programme LRTAP ('Long Range Transboundary Air Pollution') sur le transport à longue distance des polluants, appelé de ses vœux par l'UN-ECE lors de l'UNCHE, et

(b) un schéma de la structure du modèle intégré RAINS (Regional Air pollution INformation and Simulation) de l'IIASA ('International Institute for Applied Systems Analysis'), au début des années 1990 (sa version primitive datant de 1984) (voir note de bas de page n° 176).

Un modèle dit « intégré » réalise ses simulations avec des quantificateurs sur lesquels peut jouer le décideur public (il utilise typiquement, en entrée de modèle, des scénarios d'émissions projetées dans le futur), contrairement aux « modèles de chimie-transport », qui se contentent de simuler le lieu et la quantité de dépôt de polluants au sol, en fonction d'émissions données – ou, à l'inverse, de déterminer le lieu d'émissions et la quantité des émissions de polluants (par exemple, au Royaume-Uni), d'après les dépôts de polluants recueillis au sol (par exemple, en Scandinavie).


EMISSION DATA
(½° LATITUDE X 1° LONGITUDE)
CALCULATED AIR CONCENTRATION
MEASURED AIR CONCENTRATION
DISPERSION MODELS
(BUDGET, TRAJECTORY, STATISTICAL MODELS,)
METEOROLOGICAL DATA
(127 KM X 127 KM)
PARAMETERS:
DEPOSITION RATES
TRANSFORMATION RATES
CALCULATED GROUND DEPOSITION
MEASURED DEPOSITION BY PRECIPITATION

(a)


Economic activities
Emission control policies
Agriculture
Energy combustion
Transportation
Solvents, fuels, industry
NH3 control and costs
SO2 control and costs
NOx control and costs
NOx/VOC control and costs
VOC control and costs
NH3 emissions
SO2 emissions
NOx emissions
VOC emissions
NH3 dispersion
S dispersion
NOx dispersion
O3 formation
Critical loads for eutrophication
Critical loads for acidification
Population exposure
Critical levels for ozone
Environmental impacts
Emission control costs

(b)

Figure 26 : Diagrammes (a) du modèle européen LRTAP de chimie-transport du SO_2 en 1976 (en fait, la partie « chimie », *i.e.* « transformation chimique » est très rudimentaire, et négligeable par rapport à sa partie transport), et (b) du modèle intégré RAINS, version 7.2, de l'IIASA (vers 1990) [Ottar, 1976, p. 222 ; Kieken, 2004, p. 384]

Notre propos, dans cette dernière section, portera sur quelques éléments clefs de la gouvernance des pluies acides qui revêtent une importance dans notre récit général : la contribution de l'affaire des pluies acides dans les relations internationales et dans la construction d'outils de gouvernement des pollutions de l'atmosphère.

A l'image de leurs effets environnementaux, les politiques des pluies acides ont été principalement continentales. Les pays européens et les pays nord-américains ont réglé de manière principalement indépendante leurs différends autour des émissions/répercussions des pluies acides (comme s'y ingénient aujourd'hui de leur côté les pays d'Asie du sud-est). Toutefois, les implications politiques des pluies acides ont également été mondiales sous certains aspects. En 1972, lors de l'UNCHE, des baisses de SO_2, de PM et de NO_x sont exigées car responsables de smogs. La plupart des scientifiques hésitent encore à se prononcer au sujet des origines des précipitations acides (on ne trouve par exemple aucune référence aux pluies acides dans Ward & Dubos (Ed.), 1972) ; néanmoins, son évocation terrifie déjà, si bien que Paul Crutzen déclarera vingt-trois ans plus tard que le problème des pluies acides avait suscité « un intérêt politique considérable » lors de l'UNCHE [Crutzen, 1995]. Sept ans plus tard, suite à de multiples études systématiques effectuées de part et d'autre de l'Atlantique confirmant l'acidification des pluies d'origine anthropique, la Convention LRTAP ('Long Range Transboundary Air Pollution') sera signée à Genève, à la fois par la plupart des pays européens, la Commission européenne, l'URSS, mais également par le Canada et les Etats-Unis. Ce sera également le cas de la majorité des huit protocoles qui seront signés entre 1984 et 1999 sous la Convention LRTAP.

Pour commencer, quels enjeux politiques revêtent les pluies acides à partir de la fin des années 1970 ? On qualifie généralement d'« acides » des dépôts atmosphériques caractérisés par un pH en solution aqueuse inférieur à 5. Certains sont dits humides (pluie et neige acides, brouillard acide, brume acide (engendrée par des aérosols)), d'autres secs (particules sèches ou gaz). Si aucune espèce chimique affectant le pH n'est présente dans l'eau de pluie à l'exception du dioxyde de carbone (CO_2) de l'air, le pH de l'eau de pluie à l'équilibre se situe à 5,6 ; les valeurs caractéristiques de pH des pluies acides causées par les pollutions anthropiques sont comprises dans une gamme allant de 3,5 et 5,0.

On attribue l'origine des précipitations acides à divers processus naturels ou activités humaines, qui produisent directement ou indirectement de l'acide sulfurique, de l'acide carbonique, de l'acide nitrique, de l'acide chlorhydrique ou de l'acide fluorhydrique. Les trois composés primaires d'origine anthropique les plus incriminés sont :

- le dioxyde de soufre (SO_2) gazeux, dont la production par l'homme est principalement liée à ses centrales électriques brûlant des matières fossiles, ses raffineries, ses usines à papier et usines de pâte à papier, les procédés industriels produisant des effluents soufrés (production d'acide sulfurique, raffinage de pétrole, métallurgie des métaux non ferreux, *etc.*), l'incinération des ordures, les transports routiers et surtout hors routiers), et très marginalement l'agriculture et la sylviculture ;[184]
- les oxydes d'azote (NO_x) gazeux, émis essentiellement par les transports, l'agriculture, et le chauffage domestique.
- l'ammoniac (NH_3). Précisons que les émissions atmosphériques de NH_3 ont pour effet de rendre les pluies plus alcalines (*i.e.* moins acides), mais que la nitrification, c'est-à-dire la transformation dans les sols de l'ammoniac en nitrate par des micro-organismes, induit par contre une acidification des sols.[185]

---

[184] Si la combustion du charbon et l'industrie chimique sont encore désignées aujourd'hui comme les deux principaux émetteurs d'acides, elles l'étaient déjà à la fin du XIX^{ème} siècle, alors que l'utilisation du charbon s'était généralisée (forges et fourneaux, brasseries, machine à vapeur). De même, s'était fortement accrue la production industrielle de carbonate de sodium (ou *« soda ash »*), qui était utilisé dans la production de savon, de détergent, de papier, de colorants, d'agents de blanchiment, de verre. Si cette production industrielle à partir de sel et d'acide sulfurique, dont le père fut Nicolas Leblanc (en 1789, dit-on), permettait de s'affranchir de la culture de la salicorne (ou « barilla ») et de la récolte du varech, sa production occasionnait des émissions d'acide chlorhydrique, d'acide sulfurique, d'acide nitrique et de suies, qui acidifiaient les pluies et polluaient l'air britannique et français. Comme leur nom l'indique, ces usines d'alcali (l'*alcali* est le nom générique donné aux oxydes et hydroxydes des métaux alcalins et à l'hydroxyde d'ammonium) produisaient également un résidu solide alcalin, le sulfate de calcium, que l'on entassait à proximité des usines ; les pluies le dissolvaient, ce qui induisait une production de sulfure d'hydrogène aqueux, dont les exhalaisons étaient toxiques.

La déposition de plaintes individuelles contre les usines d'alcali (gênes respiratoires, « nuisances » olfactives, visibilité) poussa les pouvoirs publics à réglementer leurs activités. Mais, si l'on en croit Mark Jacobson, ces litiges auraient induit peu d'arrêtés communaux. Par contre, au milieu du XIX^{ème} siècle en Europe, les grandes villes et les Etats vont jouer de plus en plus sur deux leviers : le lieu de production des pollutions ; la dispersion des fumées dans l'atmosphère, rendue plus grande grâce à l'utilisation de cheminées d'usines plus hautes. Par contre, l'Etat français finit par établir un plan de contrôle des localisations d'usines d'alkali, alors qu'on vota à la même époque au Royaume-Uni un texte, l'"Alkali Act', en 1863, qui demandait notamment une réduction de 90% des émissions d'acide chlorhydrique. Même s'il est vrai que le Parlement britannique avait déjà adopté un 'Smoke Nuisance Abatement (Metropolis) Act' dix ans plus tôt, l'"Alkali Act' de 1863 peut être vu comme le premier grand texte législatif *national* sur les pollutions atmosphériques. De nombreuses versions du texte se succédèrent, peu comparables à la première. Les commissions d'inspection furent renouvelées pendant plus d'un siècle (Robert Angus Smith était devenu en 1863 le premier « inspecteur » chargé de faire respecter l'"Alkali Act' par les industries concernées ; voir note n° 6 du Chapitre 1), sous l'égide de différentes institutions de la Couronne anglaise (du Bureau du Commerce (1863-1872) au Département de l'Environnement (1870-1875, puis 1887-1890), jusqu'à son remplacement par le Décret sur la Protection de l'Environnement de 1890. Les méthodes choisies étaient souvent une combinaison de mesures incitatives et coercitives. [Jacobson, 2002, pp. 254-257]

[185] D'après la théorie contemporaine des pluies acides, les sulfates et nitrates peuvent se former, d'une part, dans l'atmosphère par le biais de réactions du panache de SO_2 ou de NO_x avec d'autres gaz présents dans l'atmosphère (réactions en phase gazeuse) ou lors de réactions hétérogènes sur les aérosols, puis être lessivés par la pluie ; ou, d'autre part, en phase aqueuse dans les nuages, avant de tomber en pluie. Dans ce dernier cas, le SO_2 se dissout dans

Les principales zones de production fixes de SO_2 et de NO_x demeuraient jusqu'aux années 1980 les grands bassins industriels et miniers de la France et de l'Angleterre, la Ruhr, la Lombardie, ainsi que les Etats-Unis ; puis, à partir des années 1990, principalement les pays de l'est de l'Europe, et la Chine et les autres pays de l'Asie orientale. Les régions les plus touchées aujourd'hui par les dépôts acides seraient l'est canadien, le nord-est états-unien, le sud de la Scandinavie, l'est et le centre de l'Europe, la Russie ; ainsi que, avec une nette augmentation, la Chine, l'Inde, la Corée, le Japon et la Thaïlande. Au fil des recherches menées depuis la fin du XIX^{ème} siècle, il a été reconnu que les dépôts acides altéraient la biomasse des milieux forestiers et agricoles (feuilles, aiguilles et racines des végétaux), étaient mortellement néfastes à certaines espèces de poissons, d'amphibiens, d'invertébrés et de microorganismes vivant dans les lacs et les rivières, avaient des impacts sur la santé humaine, et comme l'une des pollutions qui dégradent les bâtiments et les sculptures (elles érodent le grès, le calcaire, le marbre, le cuivre, le bronze, le laiton). Malgré la mise en œuvre d'un second Protocole LRTAP sur le soufre en 1994, qui fut principalement imaginé pour palier aux insuffisances de l'action contre les pluies acides en Europe centrale, celles-ci décimaient encore des forêts entières en Pologne et en République tchèque au tournant des années 2000 [Jacobson, 2002, pp. 263-265]. Aujourd'hui, les inquiétudes des scientifiques demeurent pour certaines régions orientales de l'Amérique du nord et le nord-est de l'Europe, mais elles sont sans commune mesure avec celles de certaines régions d'Asie de l'est et du sud-est, qui baignent fréquemment dans les fumées – la combustion du charbon pour la production d'électricité et les émissions automobiles demeurant les principales causes du phénomène.

Revenons à présent à la thématique "pluies acides et relations internationales". Elle est, d'abord, tributaire de l'action de certains scientifiques, qui utilisèrent l'exceptionnelle caisse de résonnance médiatique des questions environnementales dans les années 1970-80 pour alerter sur la possibilité de transport de dioxyde de soufre à grande distance, pouvant provoquer des pluies acides. Parmi eux s'y attelèrent deux Suédois, Bert Bolin, le Directeur de l''International Meteorological Institute' (IMI), et Knut Henning Rodhe, son collègue de l'Université de Stockholm en 1957. Dès 1972, dans la cadre des conférences de l'UNCHE, ils présentèrent leur travail de synthèse sur *La pollution de l'air entre les frontières nationales :*

---

les gouttes d'eau et libère des ions HSO_3^-, qui sont oxydés par des oxydants dissous tels l'ozone (O_3) ou le peroxyde d'hydrogène (H_2O_2), d'où la libération d'ions hydronium (H^+) et l'acidité ; cette dernière réaction est catalysée par les acides ou des éléments métalliques à l'état de trace dans les gouttes d'eau. Quant à l'acide nitrique HNO_3, autre responsable de l'acidité des pluies, il se forme par oxydation de NO_2 le jour, et par des réactions hétérogènes à la surface des aérosols et dans des réactions homogènes et hétérogènes impliquant N_2O_5 la nuit. Enfin, outre l'ammoniac (NH_3), les ions alcalins Ca^{2+}, Na^+, K^+, présents dans les aérosols minéraux (poussières ou sable), sont basiques et ont donc pour effet de diminuer l'acidité des gouttes. [Sportisse, 2008, pp. 245-251]

l'impact du soufre sur l'air et les précipitations, qui faisait la part belle aux études sur les retombées acides transfrontières sur l'Europe du nord. Au cours des décennies 1970-90, de nombreuses rencontres internationales auront lieu, afin de définir la Convention LRTAP (1979) et d'élargir le spectre des polluants transfrontières réglementés, par le biais des huit protocoles LRTAP – le Protocole LRTAP sur le financement d'un programme EMEP sur le long terme (1984) ; les Protocoles sur les émissions transfrontières de soufre (Helsinki, 1985), sur les oxydes d'azote (Sofia, 1988), sur les VOC (Genève, 1991), sur le soufre à nouveau (Oslo, 1994), sur les métaux lourds (Aarhus, 1998), sur les POP (Aarhus, 1998), et enfin le Protocole sur l'acidification, l'eutrophisation et l'ozone au niveau du sol (Gothenburg, 1999). [Fisher, 1975, p. 1063; *Social Learning Group*, 2001, "Appendix 2B.1. Chronology of the Acid Rain Issue"]. Parallèlement, des normes sur l'acidification des pluies et la qualité de l'air étaient proposées par l'OMM, par l'OMS, par l'UNEP, qui encourageaient les échanges diplomatiques, et par ailleurs les études comparatistes, donc les coopérations scientifiques (entre Amérique du nord et Europe ; et surtout, à partir des années 1990, entre Amérique du nord et Asie, ou entre Europe et Asie).

Il faut toutefois modérer la dimension trans-continentale des politiques sur les pluies acides (de même que, aujourd'hui, sa dimension mondiale). Dans l'ouvrage collectif *Acid in the Environment: Lessons Learned and Future Prospects*, la politiste Miranda Schreurs souligne par exemple le fait que les Etats-Unis ne signèrent pas le Protocole LRTAP de 1985 sur le soufre. S'ils signèrent, en revanche, celui sur les NO_x en 1988, c'est qu'ils menaient déjà un programme national et possédaient les technologies qui leur permettraient d'atteindre sans efforts supplémentaires les objectifs de réduction de NO_x fixés par le LRTAP [Schreurs, 2007, pp. 137-145]. Mais, il faut aussi préciser que les Etats-Unis préparaient alors, de leur côté, un programme de réduction du SO_2 via un amendement de leur 'Clean Air Act' (qui viendra en 1990), et ne voyaient donc guère d'intérêt à signer un Protocole international LRTAP sur le soufre en 1985… En fait, à dire vrai, Européens et Nord-américains tracèrent, pour l'essentiel, deux chemins indépendants pour résoudre leur problème d'acidification des pluies.

Il existe, à ce propos, une littérature comparatiste pléthorique, qui soupèse les résultats respectifs, et disserte sur les effets vertueux et pervers des moyens adoptés par :

- d'une part, les Européens, qui se donnèrent comme fil directeur principal la Convention LRTAP de l'UN-ECC, adoptée en 1979. L'un des principaux écueils qui se dressa fut la coopération entre pays de l'ouest et pays de l'est de l'Europe (et ceci, y compris après la chute du mur).[186]

[186] Dans l'ouvrage collectif *Acid in the Environment: Lessons Learned and Future Prospects* (2007) s'opposent deux visions de cette collaboration, l'une jugeant les résultats insatisfaisants [Schreurs, 2007], l'autre, assez admirables [Andonova,

- d'autre part, les Nord-américains. Canadiens et Etats-Uniens signèrent certains textes du LRTAP, certes, mais leur agenda de négociations fut surtout dicté par le bilatéral 'Memorandum of Intent to negotiate an agreement on transboundary pollution' qu'ils avaient signé en 1980. Il mènera finalement à la signature en 1991 d'un 'Air Quality Agreement' sur les problèmes transfrontaliers de qualité de l'air (accompagné d'une coopération scientifique), signé par le Premier ministre Brian Mulroney et le Président George Bush. La problématique des pluies acides avait joué un rôle nodal dans l'élaboration du texte, tant et si bien que, au cours des négociations de 1986-88 entre le "pressant" B. Mulroney et le "velléitaire" Ronald Reagan, les médias nord-américains parlaient communément de « traité sur les pluies acides ».

Indices environnementaux et approches réglementaires

Enfin, tout aussi importants que les réseaux de mesure de SO_2, tout aussi décisifs que les rencontres internationales et les premiers grands traités internationaux sur la pollution de l'air de la Convention LRTAP, qui contribuèrent à faire de premiers pas dans la construction d'une coopération mondiale sur les pollutions atmosphériques dès la fin des années 1970, des *outils de gouvernement pérennes* furent développés autour des pluies acides.

Pour commencer, il fallut élaborer des *indices environnementaux* liant de manière quantitative émissions de polluants et effets néfastes sur l'environnement, afin que les décideurs politiques puissent se donner des objectifs d'émissions à ne pas dépasser au cours des années et décennies à venir. En effet, même si des techniques d'ingénierie de "désacidification" des eaux ont été employées ici ou là,[187] la principale voie politique tracée a, partout et toujours, été la réduction des émissions de SO_2, NO_X, *etc.*, dans des proportions calculées afin de rendre bénins les effets néfastes sur la santé humaine et les écosystèmes qui leur étaient attribués – les deux principales méthodes étant l'utilisation d'un charbon à faible teneur en soufre, et la soustraction d'une partie du soufre à l'intérieur des cheminées d'usine pendant la combustion du charbon, à l'aide de quelque épurateur [Jacobson, 2002, p. 271]. Nous nous contenterons ici d'introduire les indices environnementaux, élaborées de part et

2007]. Il serait, par ailleurs, intéressant de voir le rôle politique joué par les pluies acides dans la construction européenne, comme Stefan Aykut l'a fait dans sa thèse au sujet du changement climatique (*Cf.* Aykut, 2012, « Deuxième Partie. Le climat et l'Europe », pp. 175-264).

[187] Afin de réduire leur acidité, de la chaux a ainsi été saupoudrée en quantité importante dans des lacs, à l'aide d'hélicoptères ou d'avions. La Suède possédait le plus important programme de « chaulage ('liming') » au monde au début des années 2000. Elle déversait chaque année 200 000 tonnes de calcaire finement broyé dans ses lacs et ses cours d'eau, écrivait M. Jacobson en 2002. Depuis les années 1970, plus de 7 000 des 17 000 lacs suédois acidifiés par l'homme avaient été traités à la chaux (un tel traitement étant nécessaire tous les deux ou trois ans). D'autres pays ont mené des programmes de chaulage, dont la Norvège, la Finlande et le Canada [Jacobson, 2002, pp. 267-268]. Outre ces expériences de "désacidification" des lacs, les pluies acides ont inspiré d'autres développements ingénieriques, comme l'avaient rapporté neuf ans plus tôt Owen Bricker et Karen Rice, de l'"U.S. Geological Survey' : « développer des poissons et des arbres plus tolérants à l'acidité » ; « manufacturer des peintures et enduits plus résistants aux acides ». [Bricker & Rice, 1993, p. 171]

d'autre de l'Atlantique au cours des décennies 1980-90, avant de les confronter dans la Partie C aux outils de gouvernement de la couche d'ozone et du climat global.

Comme l'a montré Anthony Patt, les débats politiques sur les pluies acides et le SO_2 en Europe se sont traduites par la cohabitation de plusieurs épistémologies – atteintes aux populations halieutiques, dommages faits à la végétation, santé publique, dégâts de l'acidité sur les bâtiments –, et par la confrontation de plusieurs modèles de gestion du risque – analyse coût-bénéfice, objectifs de concentrations liées à des normes sanitaires, objectifs fixés par des bio-indicateurs. Si les Européens feront dans un premier temps primer une analyse coût-bénéfice combinant effets sur la santé et sur les écosystèmes (*cf.* UN-ECE 1982), ils mettront finalement au cœur de leurs calculs de réduction des émissions – chose rare pour les pollutions de l'atmosphère – *un bio-indicateur : les « charges critiques »*. Au cours des négociations du premier protocole sur les oxydes d'azote, qui sera signé à Sofia en 1988, il était clair que « le LRTAP avait adopté le concept de charges critiques comme base de la détermination des objectifs de réductions dans le futur », affirme A. Patt. L'approche dite « par les charges critiques » était alors définie comme une « estimation quantitative de l'exposition à un ou plusieurs polluants, en dessous de laquelle, dans l'état actuel du savoir, aucun effet nuisible significatif n'advenait sur des éléments sensibles bien définis de l'environnement (UN-ECE 1988) » – à savoir, des végétaux (feuilles ou épines d'arbres, en particulier), ou des écosystèmes vivants sur et dans les sols, les végétaux, les milieux aqueux. Les réductions de polluants ont pour visée de faire passer les mesures sous les seuils de charges critiques – à savoir, sous une certaine quantité de charge acide par hectare et par an (exprimée typiquement en kg/ha/an ou en éq acide/ha/an).[188]

De premières estimations du début des années 1980 avaient indiqué que les lacs scandinaves pourraient supporter seulement 3 kg par hectare de dépôt de soufre avant de montrer des signes néfastes d'acidification. Ce chiffre correspondait à une réduction des dépôts d'alors s'élevant à 80% environ, c'est-à-dire à des réductions très importantes d'émissions de SO_2, notamment au Royaume-Uni, désigné comme le principal responsable des pluies acides scandinaves (hors Scandinavie, en tout cas)... Les tensions entre Britanniques, et Suédois et Norvégiens, furent vives au tournant des années 1980. Une fameuse illustration de la controverse est à trouver dans un échange daté de 1977. Un éditorial de la revue *Nature*, basée au Royaume-Uni, avait titré « un problème à un million de dollars – une solution à un milliard de dollars ? ». Cette somme à dix chiffres était prétendument fondée sur un calcul coût-bénéfice relatif à la valeur du poisson et au coût d'installation de systèmes de nettoyage des fumées dans les usines de production électrique.

[188] Pour une définition plus fine de l'indicateur, voir Leeuw, 2002, pp. 136-138.

Et, l'éditorial se concluait sur la proposition que les Britanniques fournissent gracieusement de la chaux à la Norvège afin qu'elle désacidifiât ses lacs, accompagnée du jugement de valeur suivant : « le gouvernement norvégien serait bête ('foolish') de rejeter une telle proposition d'emblée – comme cela semble être assez probable ». Dans le volume suivant de *Nature*, Erik Lykke, du Ministère de l'Environnement norvégien, rétorquait que les pays émetteurs tels que le Royaume-Uni devraient plutôt songer aux dégâts domestiques faits par le dioxyde de soufre sur la santé, les matériaux, l'agriculture et les écosystèmes naturels, et que le phénomène des pluies acides n'était pas une lutte de la Scandinavie contre le reste de l'Europe, mais de l'Europe contre elle-même. Outre cette déclaration diplomatique, E. Likke critiquait l'analyse coût-bénéfice de l'éditorial de *Nature*, soutenant que, si tous les dégâts avaient été pris en compte, le bénéfice économique des réductions d'émissions de SO_2 eût paru évident. Likke souligna, plus généralement, l'incomplétude de l'analyse coût-bénéfice en question. [*Nature*, 1977 & Lykke, 1977 **in** Menz & Seip, 2004, p. 256 & Semb, 2001, pp. 103-104]

Bien que simple en apparence, la définition des charges critiques est peu opérationnelle car très plastique, toute quantification devenant très complexe, puisque devant prendre en compte l'action de chaque polluant, voire même les actions conjointes de plusieurs polluants, sur plusieurs types d'écosystèmes. Comme le montre A. Patt, il fallut une forte pression des Scandinaves (par le biais de leurs chercheurs, notamment, des scientifiques suédois arguant par exemple que le concept de charges critiques était « politiquement neutre », en cela qu'il se fondait uniquement sur les résultats scientifiques – par opposition par exemple à la plupart des analyses coût-bénéfice), des ONG environnementalistes (qui reconnaissaient dans la définition de l'approche des « charges critiques » une mesure politique basée sur un « principe de précaution »), et de scientifiques coopérant au LRTAP, pour qu'advienne finalement en 1988 l'adoption d'une méthode standardisée d'élaboration de cartes de charges critiques par sa 'Task force on mapping' (TFM), c'est-à-dire de cartes des "effets environnementaux" des pluies acides devant permettre de calculer, nous l'aurons compris, les réductions de SO_2, de NO_x, *etc.* nécessaires à l'éradication des épisodes de pluies acides en Europe. Dernier acteur : le modèle RAINS, qui aida à l'adoption des charges critiques par les négociateurs, ces derniers n'hésitant plus, à partir des années 1990, à présenter les baisses d'émissions différenciées de soufre comme politiquement neutres, scientifiquement robustes, et comme une alternative intelligente à des réductions d'émissions à pourcentages fixes, qui étaient nécessairement fortement

arbitraires. [Patt, 1999, p. 1 & 6-7 ; Sundqvist *et al.*, 2002, pp. 150-152 ; Dietrich, 1995 **in** Patt, 1999, p. 10][189]

Du côté des Etats-Unis, à présent : l'expertise de l'EPA sur les effets du SO_2 et des NO_x est restée guidée principalement par des *analyses coût-bénéfice*, sur le modèle de ses premiers 'National Ambient Air Quality Standards' (NAAQS ; 1970-…). Dans un premier temps, cette expertise ne fit pas grand cas d'éventuels effets du SO_2 et des NO_x sur la qualité de l'eau, la faune et la flore dans l'élaboration de ses normes environnementales. Mais, la création du 'National Acid Precipitation Assessment Program' en 1980 changea la donne. Les résultats du 'National Acid Precipitation Assessment Program' (NAPAP), publiés en 1991 dans divers rapports (l''Integrated Assessment Report', l''Acidic Deposition: State of Science and Technology. Summary report', les '27 *State-of-Science and State of Technology* (SOS/T) reports'), résultats sur lesquels s'appuyèrent les amendements de 1990 du 'Clean Air Act pour le SO_2 et les NO_x, ne se limitaient nullement à la question de risques sanitaires locaux et à court terme. Par exemple, rapportent Frederic Menz et Hans Seip, seize des vingt-sept expertises du SOS/T portaient sur les effets (et, *in fine*, les coûts) des dépôts acides sur les ressources aquatiques et terrestres. Sept d'entre elles s'intéressaient à la chimie des eaux de surface et leurs effets, trois aux réponses des forêts et de la végétation, trois aux impacts sur les matériaux, alors que deux seulement concernaient les effets sur la santé. Une expertise, enfin, portait sur la visibilité. Précisons qu'une bonne visibilité est à la fois bénéfique au tourisme, au transport aérien, et au "bien-être", à la santé (la visibilité est ainsi utilisée comme indicateur environnemental quantitatif d'intensité du smog depuis le XIX^{ème} siècle, d'abord en vue d'améliorer la santé publique).

L'analyse coût-bénéfice du NAPAP – nécessairement incomplète, comme par exemple pour les effets potentiels de réductions de SO_2 et NO_x sur les cultures agricoles, qui furent jugés impossibles à estimer dans la mesure où le SO_2 et les NO_x ont à la fois des effets néfastes sur les plantes et un effet bénéfique puisqu'elles constituent des nutriments pour les végétaux (pour plus de détails, voir Menz & Seip, 2004, pp. 257-258) – estima le coût des émissions de soufre aux niveaux de 1990 entre 5,3 millions de dollars et 27,5 millions de

[189] Les auteurs STS Sundqvist Göran, Letell Martin, Lidskog Rolf ont décrit « la Convention LRTAP comme l'un des régimes les plus 'science-based' qui soient. Elle est, affirment-ils, considérée par les chercheurs comme par les politiciens comme une forme exemplaire de coopération entre science et politique. A l'intérieur de la convention, le concept de charges critiques des écosystèmes et le système d'information d'acidification régionale autour du modèle numérique interactif RAINS ont joué le rôle d'outils importants de connexion du savoir scientifique et de la prise de décision politique », alors pourtant que les acteurs impliqués donnaient des significations différentes aux charges critiques, et avaient des « visions hétérogènes de la frontière entre science et politique ('policy') » [Sundqvist *et al.*, 2002, p. 147]. Pour cette coopération "entre science et politique" autour des charges critiques et de RAINS, nous renvoyons le lecteur à Sundqvist *et al.*, 2002, Patt, 1999 et Kieken, 2004. Et, pour une analyse plus détaillée, pays par pays, à Patt, 1999, pp. 5-10.

dollars annuels. Il supputa en outre qu'une réduction de 50% des dépôts soufrés créerait 20 à 31,7 millions de bénéfices économiques pour la pêche de loisirs, et que des baisses de 20-40% des composés sulfatés dans l'est américain généreraient des gains de l'ordre de 0,3 à 2,5 milliards de dollars dans les secteurs du tourisme et du transport aérien, du fait de l'amélioration de la visibilité (*NAPAP*, 1991). [Menz & Seip, 2004, pp. 257-258]

Nous l'avons vu, l'approche européenne diffère, premièrement, de l'approche états-unienne par le fait que la première choisit un indice environnemental unique, les charges critiques, portant sur des non-humains "plantes", "animaux", "écosystèmes",[190] alors que la seconde combine 'ad libitum' de nombreuses indicateurs environnementaux, dont certains sanitaires. Deuxièmement, les experts européens vont, certes continuer à proposer dans leurs expertises des analyses coût-bénéfice au-delà de la fin des années 1980, lorsque les charges critiques se seront imposées comme base des négociations dans leur régime LRTAP. Les Etats-Uniens, au contraire, privilégieront toujours l'analyse coût-bénéfice (ce qui ne signifie pas qu'aucune estimation de charges critiques n'ait été menée aux Etats-Unis)[191]. Cette approche coût-bénéfice avaient notamment été encouragée par des « marchands de doute » comme Fred S. Singer dans les années 1970-80, au sujet du SO_2 et des NO_x (sur la manière dont F. Singer utilisa les analyses coût-bénéfice pour faire du 'dumping environnemental', voir notre Introduction générale (*Cf.* Conway & Oreskes, 2010, pp. 84-98))… Mais, ce fait ne doit pas conduire à des conclusions hâtives. En fait, si l'acidification des pluies restait inquiétante au début des années 1990 dans l'est nord-américain, en Scandinavie et en Europe centrale, les mutations technologiques (dans le secteur de l'énergie notamment) et d'"heureuses" délocalisations d'activités polluantes, avaient conduit à une situation moins préoccupante dix ans plus tard. En 1994, Franz-Josef Brüggemeier pouvait toujours reprocher aux politiques de l'air de la Ruhr des dernières années d'avoir été taillées, comme toujours depuis le milieu du XIX^{ème} siècle, « pour » l'industrie allemande. Mais, il reconnaissait que des changements étaient en cours depuis le début des années 1990 pour limiter les pollutions

[190] Les charges critiques de dépôt acide total étaient en principe exprimées en masse par hectare et par an (kg/ha/an) avant le tournant des années 2000, puis postérieurement plutôt en équivalence de charge acide par hectare et par (éq/ha/an) – puisque le soufre et l'azote ont des masses atomiques différentes. De nos jours, les scientifiques se présentent souvent comme en capacité d'estimer et de cartographier le dépôt acide (oxydes de soufre et d'azote) total (humide et sec), les charges critiques et les dépassements dans les écosystèmes terrestres (sols forestiers en terrain élevé) et aquatiques. [*Site web du Conseil canadien des ministres de l'environnement*, 2008, http://www.ccme.ca/files/Resources/fr_air/fr_acid_rain/d_p_ts_acides_pn1413.pdf (10/09/2014), p. 1]

[191] De fait, de la même manière que des analyses coût-bénéfice ont été effectuées en Europe (et au Canada) parallèlement aux estimations de charges critiques, des estimations de charges critiques ont été faites aux Etats-Unis parallèlement aux analyses coût-bénéfice. Comme le précise le rapport NAPAP 2011 pour le Congrès des Etats-Unis, ces études demeurent toutefois moins nombreuses qu'en U.E. et au Canada qui, ont eux, contrairement aux Etats-Unis, décidé de se plier aux charges critiques pour lesquelles le LRTAP tranche. [*NAPAP*, 2011, p. 57]

acides, grâce à l'introduction massive de filtres à gaz et poussières dans les centrales électriques et les usines – même si J.-F. Brüggemeier constatait avec une manifeste lassitude qu'il avait fallu, pour obtenir des limites d'émissions « que des preuves accablantes fussent établies sur les dommages faits par les pluies acides » [Brüggemeier, 1994, p. 44]. Quoiqu'il en soit, en Amérique comme en Europe occidentale, les expertises effectuées au tournant des années 2000 indiquaient des baisses substantielles d'émissions de SO_2 (pour l'Europe, voir Figure 28 (a), *infra*) – qui se traduisaient notamment par des expertises de bénéfices économiques l'emportant significativement sur les coûts consentis [Bricker & Rice, 1993, p. 171 ; Menz & Seip, 2004, p. 263]. Une conséquence que l'on ne saurait uniquement imputer à des délocalisations d'activités industrielles vers les pays du Sud, mais aussi à des normes techniques appliquées aux centrales électriques et aux automobiles.

Là où la position des Etats-Unis est, par contre, très différente de l'Europe, et, de plus, originale par rapport aux politiques des pollutions antérieures, c'est au sujet du mécanisme politique adopté pour contraindre l'industrie. Ou plutôt, faudrait-il dire : pour l'inciter.[192] L'outil audacieux qui fut imaginé aux Etats-Unis pour lutter contre le SO_2 est le suivant : *la création d'un marché d'échange de quotas d'émissions polluantes* (ou 'cap-and-trade'). L'amendement du 'Clean Air Act' états-unien de 1990 *au sujet* SO_2 (donc en partie pour lutter contre les pluies acides) n'est autre que le premier grand marché national de ce type à avoir été adopté pour des pollutions atmosphériques. Le texte établit deux phases (1990-95 et 1995-2000, avec pour objectif une réduction importante d'émissions de SO_2 par rapport aux niveaux de 1980 (de 10 millions de tonnes – contre des réductions de 2 millions de tonnes de NO_x).

S'appuyant sur cet instrument, la politique menée aux Etats-Unis a conduit à des réductions d'émissions de SO_2. Elle aurait également, selon certains auteurs, limité le coût de ces réductions (par rapport à la procédure européenne, par exemple), en permettant aux installations de développer des méthodes au coût progressivement moindre. D'autres

[192] Evidemment, adopter une méthode incitative n'a rien de nouveau (pas plus que l'adoption d'une analyse coût-bénéfice n'était nouvelle dans les années 1970 !). Inciter l'industrie à utiliser les « meilleures technologies disponibles ('Best Available Technologies' (BAT)) est le principal canal emprunté par les politiques de l'air et de l'eau aux Etats-Unis, au moins depuis les 'US Clean Air Act' (1963) et 'US Clean Water Act' (1972) (Et, ironie du sort, on trouve, parmi les premières législations nationales utilisant le concept de « best available technologies » (et/ou de « best practicable means »), les amendements à l'"Alkali Act' de 1864 et 1874 (voir note de bas de page n° 184 *supra*).).

En outre, pas plus qu'aujourd'hui, le concept de BAT n'était tabou pour les Européens dans les années 1970-80. A la Conférence LRTAP de Sofia en 1988, les pays européens signataires s'accordèrent pour geler les émissions de NO_x au niveau des émissions de 1987, mais aussi dans le même temps à mettre en œuvre certaines normes de « meilleures technologies disponibles ». Et, dix ans plus tard, la première grande directive sur les installations de combustion de l'UE (the 'Large Combustion Plant Directive' (LCPD) 88/609/EEC) fixait des plafonds d'émissions de SO_2, de NO_x et d'aérosols basés sur le principe de 'Best Available Technology' (BAT) [Patt, 1998, p. 4 ; *Website of European Commission*, 2005, http://ec.europa.eu/environment/enveco/ex_post/pdf/lcpd.pdf (09/09/2014), p. 2]. Le concept, de toute façon, ne dit pas grand' chose en soi, puisqu'il dépend des normes de « meilleures technologies disponibles » fixées et de la flexibilité de leur mise en application (dont il n'est évidemment pas l'endroit de parler ici).

acteurs, des organisations de la société civile en particulier, ont par contre critiqué la nature du chemin pris – « une pollution à vendre » –, qui pourrait créer un antécédent pour des politiques qui deviendraient inefficaces dans une conjoncture différente ; ils ont, par ailleurs, communiqué sur les différences de traitement entre régions qu'induisaient un tel mécanisme, qui permettait d'échanger des permis d'émissions entre régions, mettant ainsi en avant une forme d'injustice environnementale [Swift, 2005, p. 3 ; voir aussi Bernier, 2008, pp. 21-29].

La littérature sur cette controverse sociotechnique autour du 'SO_2 emissions cap and allowance trading program' est vaste. Quoiqu'il en soit, le modèle a été dupliqué dans la gouvernance climatique. Le système communautaire d'échanges de quotas d'émissions a en effet été appliqué au CO_2, puis pour d'autres gaz à effet de serre, dans le cadre de la mise en œuvre du Protocole de Kyoto (1997) – pour l'Union européenne, ceci se fit par le biais de l'adoption de la directive 2003/87/CE. Ajoutons que d'autres mécanismes d'échanges de droit à polluer viennent compléter ce système d'échange de quotas d'émission de gaz à effet de serre : des mécanismes de mise en œuvre conjointe (MOC), et des mécanismes de développement propre (MDP). Le mécanisme de développement propre (MDP) permet aux industries des pays industrialisés d'investir dans des projets de réduction d'émissions dans des pays en développement, en échange de « crédits » (ou 'Certified Emission Reduction', CER). Le mécanisme de mise en œuvre conjointe (MOC) fonctionne de la même manière, si ce n'est que ces projets sont réalisés dans les pays industrialisés et génèrent des unités de Kyoto appelées ERU ('Emission Reduction Units') (voir note n° 13 du Chapitre 8 et Bernier, 2008).

Pour conclure, ce Sous-chapitre 3.2 avait pour visée de décrire succinctement :

(i) le rôle des pluies acides dans la montée en échelle de la thématique des pollutions de l'air (par le biais des mesures continentales de SO_2 et de NO_x), et dans des études précoces sur les cycles biogéochimiques globaux (du soufre, de l'azote) ;

(ii) la contribution des pluies acides dans la construction de réseaux internationaux de mesure et de réseaux de scientifiques ;

(iii) leur dimension politique internationale, et parfois transcontinentale, qui participera à l'élan médiatique, scientifique et politique pour les pollutions atmosphériques (et, la montée en puissance de l'écologie politique) à la fin des années 1980 (voir Figure 27 ci-dessous) ;

(iv) les nouveaux types d'indices environnementaux, et de modèles chimie-transport ou de modèles intégrés, qui furent élaborés pour gouverner les pluies acides. Dans

les chapitres suivants, nous détaillerons ces aspects pour les cas de la destruction de l'ozone stratosphérique et du changement climatique (qui, eux, contrairement aux pluies acides, sont définis par les scientifiques comme des phénomènes atmosphériques globaux), en entrant plus avant dans les controverses.

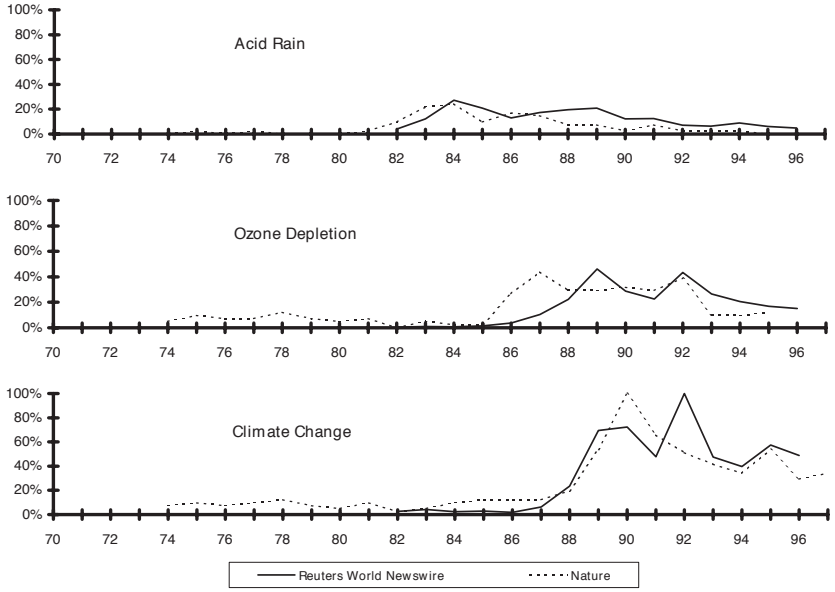


Figure 27 : Visibilité des pluies acides, de la destruction de l'ozone et du changement climatique, dans les médias et les revues scientifiques, au cours des années 1970-90 (ordre de grandeur, donné par des indicateurs de présence de ces problématiques dans le 'Reuters World Newswire' et la revue *Nature*, d'après le 'Social Learning Group' de la 'Harvard Kennedy School')
[*Social Learning Group*, 2001, "Figure 2.5. Attention to global atmospheric issues"]

En outre, le présent sous-chapitre n'avait nullement l'intention de rentrer dans les détails de la 'Realpolitik', ni même des controverses sociotechniques des pluies acides, entre scientifiques, société civile, ministères de l'environnement, *etc.* ; pas même d'étudier les controverses au sein de la seule arène scientifique. Il ne s'agira pas non plus pour nous de dresser, dans cette conclusion au sous-chapitre, un bilan des réussites et échecs du programme politique sur les pluies acides. Il nous semble néanmoins indispensable de donner à ce propos quelques éléments extraits de la vaste littérature sur le sujet :

(i) Après des années 1980 de mise en place lente, où les résultats ne conduisent qu'à une faible diminution des émissions de SO_2 et de NO_x (malgré des programmes nationaux présentés comme ambitieux initiés dès le début des années 1970, voire les années 1960 pour le SO_2, qui visaient à réduire le SO_2 pour des raisons de qualité de l'air et non d'acidification des pluies), les décennies 1990-2000 verront des diminutions moyennes significatives de ces polluants de part et d'autre de l'Atlantique, ainsi que d'autres polluants. Ce résultat découla rarement de changements de mode de vie et/ou de transport, mais surtout de réglementations coercitives ou d'incitations à l'innovation technologique, principalement dans les

secteurs économiques de l'énergie et de l'industrie (pour l'Europe, voir Figure 28 ci-dessous).[193] Répétons, par ailleurs, que les réductions de SO_2 et de NO_x n'avaient pas été entreprises exclusivement pour des questions de pluies acides, mais aussi de qualité de l'air ; et, en vérité, à partir des années 1990, il devient presque impossible de mesurer la part de la lutte contre les pluies acides dans les luttes contre les SO_2 et NO_x. Quoiqu'il en soit, des phénomènes de baisses de dépôts acides d'origine atmosphérique furent observés dans de grandes portions de l'Amérique du nord et de l'Europe au cours des décennies 1980-90, que certaines scientifiques ont qualifié de phénomène de « réparation de l'acidification » (par exemple, Stoddard *et al.*, 1999).

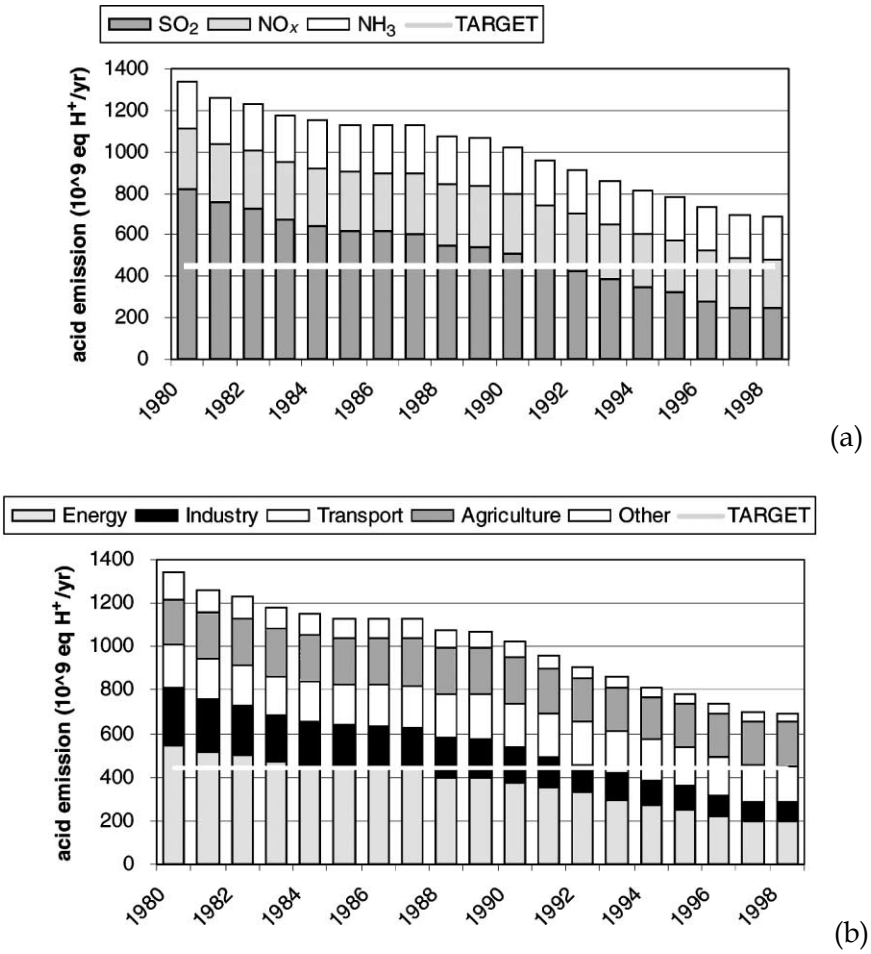


Figure 28 : Contribution aux émissions cumulées de substances acidifiantes de « l'Europe des quinze » (les pays de l'U.E. entre 1995 et 2004, donc sans les pays d'Europe centrale), entre 1980 et 1998, (a) de la part des trois principaux polluants incriminés, puis (b) de la part de chaque secteur économique. La cible d'émissions à atteindre ('target'), est celle dont ont débattu les pays de l'UE en 2000 (ils sont légèrement plus stricts que ceux fixés en 1999 par le LRTAP)
[Leeuw, 2002, p. 137]

[193] Pour les Etats-Unis, voir par exemple Lents, 1998, pp. 219-221. Pour un comparatif Etats-Unis / Europe, voir les rapports de l'"European Environment Agency' et du NAPAP.

(ii) A l'inverse, pendant les années 2000, les courbes des Grands pays émergents, de la Chine en particulier, suivaient des tendances généralement inverses. Notamment à cause de la combustion de charbon, les pluies acides sont manifestement devenues « un problème sérieux et grandissant » en Chine, constataient par exemple les auteurs chinois et états-uniens dans une étude publiée en 2010 dans *Atmospheric Chemistry and Physics* [Lu *et al.*, 2010]. Nous reviendrons sur les tendances mondiales d'émissions de SO_2 et NO_x dans les Chapitres 8 et 9, en lien avec leurs effets climatiques.

(iii) Les baisses de SO_2 et NO_x ne signifient pas qu'elles soient durables, ni qu'elles contentent tout le monde. D'abord parce que, alors que les émissions diminuent, les études épidémiologiques, toxicologiques, biologiques, souvent encouragées par des associations de la société civile, ont tendance de manière générale à revoir à la baisse les seuils de tolérance des organismes vivants aux pollutions.[194] Ensuite, bien qu'elles ralentissent l'activité économique, et induisent donc des baisses conjoncturelles de polluants, les baisses d'activité économique correspondent aussi, par ailleurs, à des réductions d'investissements publics et privés pour les "technologies propres" (et, autre conséquence, dans le cas de réductions basées sur des marchés de droit à polluer, elles font s'effondrer le cours de la tonne de polluants – comme ceci s'est produit avec la crise mondiale du tournant des années 2010 avec le prix de la tonne de SO_2 et de CO_2). Dernier exemple (parmi d'autres possibles), la question de la « justice environnementale » demeure pertinente même dans les pays du Nord, dont les programmes, s'ils ont en moyenne réduit massivement les polluants soufrés et azotés, voire les particules et l'ozone, dans certaines zones urbaines, ont laissé d'autres zones – souvent celles où vivent les populations les plus pauvres – en proie à de forts niveaux de polluants (et, plus généralement, de nuisances). [Lents, 1998, pp. 218-219]

Dernier point de conclusion : si les pluies acides demeurent une "mine d'or" pour les microbiologistes et "écosystémiciens" des forêts, des sols, des milieux aquatiques (voir Gorham, 1998), la situation a été différente du côté des atmosphériciens. Pour les

[194] Pour l'Association pour la Prévention de la Pollution Atmosphérique (APPA ; créée en 1958 et reconnue d'utilité publique en 1962), en France, la période « 1988-1997 » fut principalement marquée par « le développement extraordinaire des connaissances sur les effets de la pollution atmosphérique grâce aux nouvelles approches épidémiologiques ». La suivante, « 1998-2008 », aurait été celle des « pollutions atmosphériques au regard des sciences humaines et sociales, et de la prise de conscience du changement climatique ». Quant aux trois périodes antérieures à 1988, elles auraient été marquées par la « Fondation du dispositif français de lutte contre la pollution atmosphérique » (1958-1967), par la création des réseaux de mesures en France et des premières actions de lutte contre la pollution atmosphérique avec des aspects information/prévention (1968-1977), et, enfin, une époque de bouleversement des échelles de pollution (1978-1987), au cours de laquelle émergent les thématiques de la pollution de l'air intérieur et du climat climatique… en passant par les pollutions atmosphériques transfrontières. [*APPA*, 2014]

scientifiques de l'atmosphère européens et nord-américains, les pluies acides n'ont souvent été qu'un lieu de passage furtif dans les années 1970-80, soit pour des spécialistes de la "qualité de l'air" – spécialistes météorologistes ou chimistes qui, une fois la réglementation des polluants acides sur de bons rails dans les années 1990, retourneront vers les autres pollutions locales et régionales (dont l'extension géographique et le nombre de polluants pris en compte auront augmenté entre temps) –, soit pour des scientifiques qui avaient un pied dans la chimie de l'ozone stratosphétique (ainsi, Paul Crutzen cosignera en 1982 un article sur les pluies acides (Rodhe *et al.*, 1982)). Toutefois, les pluies acides avaient aussi amené des météorologistes (par exemple, C.-G. Rossby, B. Bolin, H. Rodhe, pour ne citer que des Suédois) à scruter de plus près les interactions chimiques dans l'atmosphère. Elles avaient, enfin, fait se spécialiser à l'étude de l'atmosphère des chimistes venus de l'agronomie, tels qu'E. Eriksson.

Conclusion de la Partie A

La construction épistémologique de l'équilibre de la couche d'ozone, et ses premières fragilisations

Dans cette Partie A, nous avons fait le récit de la construction d'une couche d'ozone en équilibre chimique par des physiciens-astronomes et des physiciens-météorologistes. Dans le Chapitre 1, nous avons exposé une première phase, au cours de laquelle les savoirs avaient peu évolué. Au tournant des années 1940, la théorie photochimique de l'ozone stratosphérique, qu'exposent par exemple Wulf et Deming, demeure très semblable à celle de Chapman dix ans auparavant. Dans leur ouvrage de synthèse *De la Stratosphère à l'Ionosphère*, les astronomes et géophysiciens français Barbier et Chalonge jugent cette théorie apte à rendre compte « dans ses grandes lignes de la distribution de l'ozone en altitude » (destruction d'O_3 par des chocs avec des particules rapides ou de certaines radiations ultraviolettes ; genèse d'O_3 sous l'action d'autres radiations ultraviolettes) ; mais, constatent-ils, la théorie de Wulf et Deming n'explique pas la variation saisonnière de l'ozone, ni le fait que le maximum d'ozone s'observe à la fin de la nuit polaire (ce qui semble même « en contradiction avec » ladite théorie, écrivent Barbier et Chalonge). [Barbier & Chalonge, 1942, pp. 52-53]

En 1954, c'est-à-dire après de premières mutations importantes des études sur la moyenne et haute atmosphère à grand renfort d'avions militaires et de missiles météorologiques, Richard Goody est loin de décrire un contexte de "révolution scientifique". L'atmosphère qu'il décrit dans son ouvrage *the Physics of the Stratosphere* demeure bien *peu chimiquement réactive*, ses caractéristiques étant principalement définies par une métrologie de la composition chimique de l'atmosphère devant rendre compte d'états thermodynamiques propres aux différentes couches atmosphériques, et de variations climatologiques et météorologiques à grande échelle :

> « La composition chimique de la stratosphère diffère seulement légèrement de celle de la troposphère ; cependant, les différences mineures sont d'une grande importance, pour deux raisons. Premièrement, les changements de concentrations relatives des constituants chimiquement inertes indiquent une probable séparation dans leur diffusion : la proportion des gaz les plus légers va augmenter à mesure que les altitudes augmentent. Deuxièmement, l'état thermique de la stratosphère dépend principalement des concentrations de constituants mineurs, à savoir, la vapeur d'eau, l'ozone et le dioxyde de carbone. Des trois, l'ozone est unique, en tant qu'il est le produit d'une réaction photochimique dans l'atmosphère elle-même. C'est pourquoi

ses propriétés ont été amplement étudiées. » [Goody, 1954, « Chapter III : Composition », p. 55]

Au cours des décennies 1950-60, deux évènements vont rendre encore plus attractive la science de l'ozone stratosphérique, et la faire entrer dans une nouvelle phase rimant avec une complexification théorique significative. D'une part, les mesures sur la moyenne et haute atmosphère se multiplient, principalement en lien avec la sécurité des vols aériens militaires et aux études de traçabilité des particules radioactives émises lors des essais nucléaires atmosphériques. Or, les données révèlent les insuffisances du cycle de Chapman. Dans les années 1960, il semble établi que les calculs de niveaux d'ozone réalisés à l'aide du schème de Chapman avec les dernières constantes de réaction chimique établies en laboratoire mésestiment les niveaux mesurés dans la couche d'ozone entre 15 et 50 km d'altitude. Ils les surestiment d'un facteur « *2 » environ. [Christie, 2000, p. 14 ; Bojkov, 2010, pp. 36-37]

D'autre part, l'intensification de la recherche sur la haute atmosphère dans les années 1950-60 induit une prise en compte de nouveaux composés stratosphériques par les aéronomes. Or, celle-ci, en plus de "compléter" le cycle de Chapman pour rendre la théorie chimique plus en adéquation avec les mesures, va "mécaniquement" induire de nouvelles propositions de réactions pouvant intervenir dans la chimie de la stratosphère et de la haute atmosphère. Le champ d'étude de l'ozone voit naître des filiations de chercheurs qui poursuivent l'étude d'un composé chimique ou d'une "famille" de composés chimiques particuliers. Ainsi, aux seuls *composés oxygénés* du cycle de Chapman (1929), viennent s'ajouter après-guerre les *composés hydrogénés*, d'après une proposition de Bates et Nicolet en 1950 (les réactions impliquent les radicaux hydroxyles OH, l'atome O et la vapeur d'eau) complétée par les travaux de Hunt (Hunt, 1966). Puis, l'action des *composés azotés* est discutée. En 1970 et 1971, P. Crutzen publie des articles de référence sur la réactivité chimique de ces substances, et son implication sur la chimie générale de la stratosphère (Crutzen, 1970 & 1971) ; mais déjà, en 1967, Bates et Hays n'avaient « pas exclu » la possibilité d'une « lente réaction chimique homogène » entre l'ozone stratosphérique et les NO_x [Bates & Hays, 1967, p. 189]. Auparavant, dès 1953, R. Goody et C.D. Walshaw (le futur inspecteur des spectromètres européens lors des préparatifs de l'AGI, entre octobre 1955 et juillet 1957) avaient déjà proposé l'influence possible de la réaction : $N_2 + O_3 \rightarrow N_2O + O_2$, qui impliquait des composés azotés [Goody et Walshaw, 1953].

L'inévitable corollaire de cette complexification du schème théorique de l'ozone stratosphérique est *l'accroissement, sur un plan théorique, du nombre "d'agresseurs potentiels" de la couche d'ozone*. Dans les années 1960, ce dieu géologique est devenu une entité, certes toujours considérée comme stable chimiquement, mais multi-réactive donc potentiellement

contaminable de multiples manières. En définitive, la multiplication des études sur la stratosphère a "*fragilisé épistémologiquement*" la couche d'ozone, à l'heure-même où l'homme fait transiter un nombre croissant de technologies en son sein (avions supersoniques, fusées), et où la théorie scientifique sur l'affectation par l'homme d'un autre monstre géologique, le climat global, fait son chemin.

Cette fragilisation épistémologique de l'environnement "à l'aide d'études qui ne sont pas conçues pour estimer les impacts néfastes sur le vivant", marque un *premier moment*. Dans les Parties B et C, nous décrirons *les deuxième et troisième moments* de complexification épistémologique, qui se feront à partir des années 1970, autour des théories de destruction anthropique de l'ozone par les avions supersoniques et les CFC, d'une part, et en lien avec le changement climatique, d'autre part.

L'environnement des atmosphériciens avant la crise environnementale

En 1999, alors qu'il est Professeur de Science du Système Terre et de Chimie, et Recteur de l'Université de Californie à Irvine, le futur Président de l'Académie des sciences des Etats-Unis, Ralph Cicerone, résume presque exclusivement la fragilisation épistémologique de l'environnement par les chimistes de l'atmosphère globale aux évolutions postérieures à 1970, et aux travaux sur la couche d'ozone :

> « [Le fait que,] parmi les scientifiques de la Terre, les chimistes de l'atmosphère sont peut-être le groupe le plus enclin à partager la vision selon laquelle le Système Terre et son atmosphère sont "délicats" ("delicate") ou "fragile" ("fragile") [est lié à] l'histoire de ce champ lors des trois dernières décennies du vingtième siècle. [...] L'atmosphère de 1950 était vue comme inerte chimiquement, et pour une bonne raison – la plupart des composés chimiques connus pour être présents près de la surface étaient essentiellement inertes ('essentially inert'). [...] On sait maintenant que la production d'ozone stratosphérique à partir de la dissociation solaire de l'O_2 par les UV est contrebalancée par de très efficaces réactions catalytiques en chaîne qui détruisent l'ozone. Elles impliquent des oxydes d'hydrogène (HO_X), des NO_X, des oxydes de chlore (ClO_X), des oxydes de brome (BrO_X), et il est établi que de nombreux radicaux et molécules réactifs de HO_X, NO_X, ClO_X, and BrO_X sont formés dans la stratosphère, après que des composés stables émis à la surface de la Terre sont photo-oxydés dans la stratosphère – du CH_4, du N_2O, des chlorofluorocarbones, chlorocarbones et halons, et du CH_3Br, respectivement. Quelques uns de ces composés sources n'existaient pas dans l'atmosphère de 1970, et tous ont vu leur

> concentration augmenter depuis. » [Cicerone, 1999, "Essay: Atmospheric Chemistry and the Earth System" in Brasseur *et al.*, 1999, pp. 19-20][195]

La citation de R. Cicerone témoigne de l'importance de la chimie stratosphérique dans la genèse d'un champ d'étude sur la chimie atmosphérique. Elle témoigne aussi du fait qu'une mutation s'est opérée entre les années 1950-60 et 1999, dans la manière d'approcher scientifiquement l'objet atmosphérique. Lorsqu'il parle, en 1999, de « composés sources » qui « n'existaient pas dans l'atmosphère de 1970 », Cicerone parle de leur existence "empirique", de leur présence "réelle" dans l'atmosphère – et non, d'une méconnaissance de l'atmosphère. Il invoque donc l'existence d'un problème de pollutions anthropiques (ici, affectant la couche d'ozone).

A l'inverse, dans les années 1950-60, la plupart des scientifiques qui publient dans les revues traditionnelles de l'atmosphère ne font pas encore grand cas des pollutions chimiques (ni, par conséquent, des réactions chimiques atmosphériques). Les spécialistes des pollutions urbaines locales font exception. Mais, il s'agit souvent d'ingénieurs et de chimistes travaillant sur des cas très particuliers, liés à la spécificité des émissions locales (les smogs de Londres et de Los Angeles dans les années 1950 sont de nature très différente) ; et surtout, ils le font dans un cadre de gestion des polluants, en bonne intelligence avec les acteurs politiques et industriels locaux. Ils publient le plus souvent dans des revues différentes des scientifiques de l'atmosphère les plus en vue, qui sont des météorologistes et des aéronomes travaillant sur des échelles spatio-temporelles plus importantes, souvent avec le soutien financier des militaires. En outre, *lorsque des travaux sont menés au sujet de la pollution atmosphérique à grande échelle*, ils sortent *rarement de l'arène scientifique*.

Toutefois, de premiers programmes d'études durables sur les pollutions atmosphériques à grande échelle sont entrepris. Premier exemple : les essais nucléaires atmosphériques. Certes, écrit Matthias Dörries, « les premiers essais de bombes à hydrogène des années 1950 ne semblaient pas avoir laissé de marques clairement déchiffrables sur le climat de la Terre » (d'après la littérature accessible à tous !), si bien que la problématique resta pendant longtemps largement inconnue dans les sphères extra-scientifiques. Mais, des scientifiques poursuivirent postérieurement leurs travaux sur le sujet. Edward Teller et Michael MacCracken, du laboratoire militaire états-unien 'Lawrence Livermore National Laboratory' (LLNL), ou des gens de la RAND, continuèrent à mesurer et modéliser les impacts atmosphériques des bombes nucléaires, dont les impacts climatiques (rappelons que les

[195] Pour une histoire internaliste des recherches sur l'ozone, plus exhaustive et jusqu'à nos jours, voir les longs articles de Susan Solomon, chimiste de l'atmosphère ayant débuté sa carrière à la fin des années 1970 et devenue l'une des principales figures de la chimie stratosphérique (Solomon, 1999), et de son aîné Rumen Bojkov (Bojkov, 2010), ou l'ouvrage de l'épistémologue Maureen Christie (Christie, 2000).

Etats-Unis, l'Union soviétique et le Royaume-Uni ont signé le Traité d'interdiction partielle des essais nucléaires en 1963, mais que les militaires français et chinois ont officiellement mené des programmes d'essais nucléaires atmosphériques dans les années 1960-70)… La thématique fera finalement irruption avec fracas dans les médias au début des années 1980, sous le nom de « théorie de l'hiver nucléaire ». [Dörries, 2011, pp. 204-205]

Deuxième exemple : des études atmosphériques mettent au défit les hypothèses qui prévalent dans les milieux militaires. En particulier, au sujet des conséquences des émissions anthropiques de dioxyde de carbone. Cette hypothèse est tour à tour discutée dans trois grands rapports fondateurs des sciences *pour* l'environnement global : le rapport *Restoring the Quality of Our Environment* du 'Panel on the Environment of the President's Science Advisory Committee' (PSAC ; 1965) ; le rapport *Man's Impact on the Global Environment* du SCEP ('Study of Critical Environmental Problems' ; MIT ; 1970) ; le rapport *SMIC* ('Study of Man's Impact on Climate' ; 1971 ; d'après une conférence co-financée par le MIT, la 'Royal Swedish Academy of Sciences' et 'Royal Swedish Academy of Engineering Sciences'). Les deux derniers, bien que peu à jour aux yeux des scientifiques de l'atmosphère lorsqu'ils sont publiés, ont été avidement cités lors de l'UNCHE, puis continuèrent à servir « de points d'orientation importants » pour la nouvelle génération de scientifiques de l'atmosphère qui vit le jour dans les années 1970. [Dörries, 2011, pp. 205-207]

Troisième exemple : l'acidification anthropique et transfrontière des pluies est discutée à partir de la fin des années 1960. Au cours de l'UNCHE, Bert Bolin communique sur les travaux existants. Il expose également les conséquences possibles des émissions anthropiques de GES sur les glaces polaires et les climats.

Tout aussi décisive que ces prises de parole des scientifiques de l'atmosphère et du climat, est la mutation des pratiques : les satellites, qui offrirent une vue depuis l'espace ; des ordinateurs à la puissance grandissante. Ces derniers bouleversent littéralement les pratiques scientifiques. En même temps que leur puissance de calcul augment à vive allure, leur utilisation comme fabrication de futurs pour la décision politique gagne du terrain. Une quinzaine d'années avant l'apparition des premiers modèles intégrés de pollution atmosphérique, au début des années 1980, les économistes font des usages remarqués des modèles pour se projeter dans le futur. Dans un contexte de fort accroissement démographique mondial et d'accélération de la globalisation de l'économie, de premières simulations de développement économique et de leurs limites physiques sont ainsi réalisées pour l'humanité entière. Le tournant des années 1970 n'est pas seulement celui de la popularisation des célèbres photographies du "vaisseau Terre" par la NASA, il est également

celui des modélisations du Club de Rome, censées nous confronter à la finitude des ressources d'une entité "humanité".

Toutefois, si ces évènements ont bel et bien, comme nous le verrons, participé à construire le climat scientifique et politique sur l'environnement post-1970, il faut regarder *science par science* quelles sont les visions de l'environnement global au tournant des années 1970. Or, *en ce qui concerne les sciences des moyenne et haute atmosphères, force est de constater qu'elles ne sont pas tournées vers les atteintes aux équilibres environnementaux et/ou à la bonne santé du vivant*. Elles touchent principalement à la prévision du temps en altitude (qui conditionne les vols aéronautiques et aérospatiaux), à la formation et au rôle radiatif des nuages, et aux interactions radiations-climat et radiations-météorologie. La science de l'ozone cherche avant tout à s'inscrire dans ce *programme physicien*. Les mesures annuelles d'ozone et les études des trajets atmosphériques de l'ozone participent à la grande « fabrique de données globales » lancée par les sciences des années 1950-60. Aux côtés des fructueuses études sur le carbone 14 et les autres traceurs radioactifs, elles constituent une autre opportunité, certes plus périlleuse sur un plan instrumental mais plus durable, d'étudier les mouvements stratosphériques (voir Edwards, 2010, "Chapter 8. Making global data"). Cette tradition trouvera des prolongements dans les années 1970. Par exemple, le 'Geophysical Fluid Dynamics Laboratory' (Université de Princeton) développera un modèle numérique de circulation générale couvrant la troposphère, la stratosphère et la mésosphère, dès 1975. Il sera nommé 'Skyhigh' (et, dans le contexte des années 1970, l'un de ses enjeux principaux sera bien sûr de « simuler la réponse de la circulation atmosphérique à une grande réduction d'ozone »). [Edwards, 2010, p. 156 ; Mahlman *et al.*, 1978, "Simulated response of the atmospheric circulation to a large ozone reduction"]

La chimie de l'ozone de 1970, quant à elle, demeure principalement limitée aux interactions de l'ozone avec les radicaux hydroxyles OH, l'atome O ou la vapeur d'eau…[196] Et encore, *les aéronomes accordent une confiance limitée aux nouvelles hypothèses de chimie stratosphérique proposées*.[197] *Les études des années 1950-60 ont apporté plus d'incertitude que de*

[196] Le *Journal of the Atmospheric Sciences* états-unien constitue un bon état de l'art des études sur la moyenne et la haute atmosphères au tournant des années 1960, dans le pays le plus impliqué (aux côtés de l'URSS) dans les recherches atmosphériques à grande échelle – qui possèdent, nous l'avons dit, de forts enjeux militaires, spatiaux, et pour le développement de moyens de télécommunication. Les thèmes qui dominent alors les sciences de l'atmosphère concernent principalement la dynamique dans les hautes couches de l'atmosphère (dont les ondes de Rossby), dont l'étude nécessite le développement des observations depuis le sol (par radar Doppler, par spectromètre Dobson) et depuis l'espace (satellites). Les interactions radiations-climat, et la formation et le rôle radiatif des nuages, sont également très étudiés.

[197] De l'aveu des aéronomes eux-mêmes, les nouveaux schèmes théoriques sont jugés impuissants à expliquer les nouvelles mesures stratosphériques. « Au cours de la Commission de l'"International Ozone Commission' de 1967, rapporte R. Bojkov, une inquiétude fut exprimée, car les [récentes] données améliorées de VO3D [(vertical ozone distribution)] avaient encore soulevé de nouvelles questions concernant une théorie photochimique qui semblait bien établie dix ans plus tôt. » La situation théorique demeure dans un « *état instable* ». En retour, du fait de leur inéquation

certitude. Face à cette situation d'instabilité des savoirs, M. Nicolet aurait même surnommé la stratosphère des années 1960 « ignorosphère » [Pommereau **in** Chanin (Dir.), 2008, p. 257].*Les aéronomes ne sont pas déterminés à abandonner l'image d'immuabilité de la couche d'ozone*… Bien que la stratosphère a été fragilisée par les études belligérantes sur l'atmosphère, qui l'ont décrite comme *contaminée* par le vivant (microorganismes des sols), par les volcans, par les technologies humaines (essais nucléaires, fusées), et couplée à des processus de *moyenne temporalité* (changement climatique) voire de faible temporalité (météorologie), *la culture scientiste et technophile très marquée des scientifiques de l'atmosphère des années 1950-60 est peu propice à la "réflexivité environnementale"*. La remarque vaut pour l'ozone comme pour le changement climatique (comme nous l'avons conclu à la fin du Chapitre 2).

… Dès lors, plutôt que de nous demander pourquoi aucune alerte à la destruction anthropique de la couche d'ozone n'a été formulée avant 1970, la question devient : qu'est-ce qui explique le subit emballement pour la protection de la couche d'ozone dans les années 1970 ? Tel sera l'objet de notre Partie B.

Coopération entre universitaires et militaires, coopération entre Etats

Avant 1940, diverses écoles nationales de recherche se partagent plutôt équitablement la littérature sur la météorologie (Royaume-Uni, Allemagne, Suède, Etats-Unis, Norvège, URSS, France, *etc.*) (voir Nebeker, 1995). Par ailleurs, les grandes figures de l'aéronomie sont presque toutes britanniques, allemandes, suisses, françaises ou soviétiques. Une inertie s'est même créée, si bien qu'il existe encore de nombreuses têtes d'affiche européennes au tournant des années 1970 (Dobson, Chapman, Nicolet, Bates). Mais, et ceci malgré le fait que l'aéronomie ait compter seulement tardivement sur les satellites, au tournant des années 1970, les Etats-uniens peuvent déjà se targuer de posséder eux aussi une belle tradition d'aéronomes. Au cours des décennies 1940-60, les observatoires d'astronomie et laboratoires d'aéronomie états-uniens, les mieux financés au monde, sont déjà devenus attractifs pour les Européens. Ces décennies ont indubitablement sacré les Etats-Unis dans le domaine des sciences de l'atmosphère et/ou des sciences de la Terre.

Les raisons, multiples et bien documentées, ont été passées en revue au fil des pages de cette première partie. Insistons ici simplement sur le fait que, pour des raisons financières, idéologiques et linguistiques, l'URSS ne possédait pas la même attractivité que les Etats-Unis pour les chercheurs d'Europe de l'ouest, qui quittaient leurs pays en reconstruction pour servir une carrière plus florissante à l'étranger. Rappelons, par ailleurs, que les Etats-Unis et les Soviétiques espéraient s'appuyer sur leurs nouvelles technologies et leurs nouveaux

avec la théorie, les mesures posent question, en particulier le déficit de standardisation entre instruments, dont la standardisation des spectromètres Dobson. [Bojkov, 2010, pp. 36-37]

savoirs pour modifier intentionnellement le temps et le climat. Soit, à des fins belligérantes. Soit, à des fins progressistes, ce qu'ils projettent de faire sur leur territoire, mais aussi en "s'exportant" dans des régions étrangères peu propices à l'agriculture (voir Fleming, 2010).

Notre premier point portera sur « la science pacifique » des décennies d'après-guerre. A la fin des années 1950, l'administration fédérale des Etats-Unis propose des programmes de coopération scientifique entre les deux Blocs, aussi bien autour de savoirs "immédiatement utiles", tels que la prévision du temps, qu'autour de champs "plus fondamentaux". La "pacific science", les "peaceful uses of space / of atomic energy", *etc.* sont devenus des thèmes de conférences organisées par l'ONU ou par les agences nationales des grandes puissances militaires. Très investi dans le projet de coopération pacifique autour de l'atmosphère et de l'espace, l'influent Harry Wexler contribue au rapport de la Conférence internationale sur les usages pacifiques de l'énergie atomique de l'ONU en 1955 (puis au rapport de la Première Conférence états-unienne sur les utilisations pacifiques de l'espace de 1961).[198] A la fin des années 1950, Wexler est nommé négociateur en chef des Etats-Unis, pour concevoir un programme météorologique satellitaire commun avec la seule autre puissance spatiale d'alors, l'URSS. Avec son homologue soviétique Viktor Bugaev, il initie un « système de surveillance de la météorologie à l'échelle globale », fondé en premier lieu sur les mesures satellitaires. Cette expérience bilatérale évolue vers un programme soutenu par l'OMM, finalement rebaptisé 'World Weather Watch Programme' en 1967 (et aujourd'hui beaucoup plus multidisciplinaire qu'à ses débuts). [Fleming, 2007(a), p. 57 ; Rigby & Keehn, 1963, pp. 478-480 ; *European Space Agency's website*, 2011]

Dans le domaine des sciences de l'atmosphère à grande échelle, les Etats-Unis et l'URSS ont beaucoup à gagner à coopérer, afin d'accroître leur hégémonie scientifique et technologique. Dans les faits, néanmoins, la coopération scientifique entre l'URSS et les Etats-Unis est au mieux embryonnaire dans les années 1950-60, même sur des sujets sans grands enjeux militaires comme l'ozone. Les premiers échanges scientifiques officiels entre les États-Unis et l'Union soviétique remontent à la fin des années cinquante. En 1959, débute ainsi un programme d'échanges entre l'Académie des Sciences de l'URSS et son homologue états-unienne la NAS ('National Academy of Sciences')… Toutefois, ce n'est véritablement qu'après la signature de l'Accord scientifique et technique bilatéral de 1972, puis grâce à l'intensification des collaborations scientifiques internationales soutenues par l'ONU, et enfin lorsque l'importance militaire de l'espace et le prestige national que sa conquête

[198] "Atomic Energy and Meteorology," [Proceedings] International Conference on the Peaceful Uses of Atomic Energy, Geneva, 1955, A/CONF. 8/P276, June 23, 1955, 28 pages ; "World Weather by Satellites", *Proceedings, First National Conference on the Peaceful Uses of Space,* Tulsa, Okla., May 26-27, 1961, pp. 154-159 [Rigby & Keehn, 1963]

représente auront décliné, que les échanges scientifiques entre URSS et Etats-Unis se développeront de manière significative. A partir des années 1970 voire 1980 seulement, donc. [Moore, 1991, p. 7 ; Courteix, 1972, p. 731]

Quelques grandes figures des sciences de l'atmosphère ont marqué de leur empreinte, à la fois les programmes sur le changement climatique, sur la météorologie à grande échelle (et les débuts de l'ère satellitaire), et sur les pollutions anthropiques. Outre Harry Wexler (1911-1962), Carl-Gustav Rossby (1898-1957). Il incarne, comme Wexler, de nombreuses ambivalences des scientifiques de l'atmosphère des décennies 1940-60. Ainsi, écrit Ronald Doel, C.-G. Rossby était « plutôt à gauche sur le plan politique et [se montra] sourcilleux sur le contrôle par l'État des pratiques internationales scientifiques », mais il organisa aussi l'entraînement de milliers de météorologistes militaires au MIT, à Chicago, à UCLA. Il fit également partie des scientifiques civils qui collaborèrent au 'Committee on Geophysical Sciences', l'institution chargée de superviser le vaste domaine des sciences de l'environnement physique au sein du « très militaire » 'Joint Research and Development Board' (RDB) (qui avait été créé « dans le sillage du 'National Defense Research Council et de l'Office of Scientific Research and Development', plus puissant – il s'agit des deux principales agences états-uniennes pour l'orientation des applications de la science aux efforts de guerre durant la Seconde Guerre mondiale, y compris le programme de la bombe nucléaire ») [Doel, 2009, pp. 142-148].

Au début des années 1950, C.-G. Rossby incita par ailleurs à la création de l'EACN, qui allait devenir le réseau par lequel viendrait la première alerte retentissante sur les pluies acides. Dans le témoignage d'E. Eriksson que nous avons cité, rien n'indique que Rossby ait mobilisé des financements militaires pour lancer l'EACN, ni que sa création ait répondu à une crainte d'impacts néfastes de l'industrie sur l'environnement [Eriksson, 1998]. A la fin des années 1930, Rossby avait proposé l'existence d'ondes de circulation atmosphérique planétaire, plus tard rebaptisées « ondes de Rossby » ; l'EACN devait sans doute à ses yeux servir avant tout la théorisation de la météorologie à grande échelle, à l'aide de traceurs atmosphériques telles que les molécules de soufre, dont on savait qu'elles pouvaient parcourir de longues distances sous forme gazeuse ou solide.

A l'image de C.-G. Rossby et H. Wexler, de nombreux scientifiques états-uniens reconnus dans le champ académique iront et viendront entre *projets militaires* grassement financés, où le secret et l'utilité immédiate des recherches sont les maîtres-mots, et des *programmes de recherche plus "fondamentale"* qui peuvent faire l'objet d'une libre utilisation pour la publication dans les revues avec comité de lecture… en passant par des *projets de*

modification intentionnelle du temps et du climat, ou des *alertes au risque de développement d'armes atmosphériques et climatiques*.

Si nous nous en tenions à ces aspects "biographiques", nous resterions emprisonné dans un relativisme axiologique quelque peu stérile. Mais, alors que nous percevons des "ambivalences", des "compromis éthiques" à l'échelle de l'individu,[199] des projets beaucoup plus cohérents éclatent au grand jour au niveau des politiques de recherche… Plutôt que disserter sur l'"ambivalence" des individus, nous préférons souligner la "cohérence" des choix de programmes scientifiques des années 1950-60. Ceux-ci sont souvent conçus pour servir les deux finalités Défense / Progrès de la science, finalités qui sont présentes *ensemble* dès la conception de la plupart des projets communs aux universitaires et aux militaires. Amplement financés, la plupart de ces programmes reconnaissent, de fait, la nécessité de la recherche fondamentale pour régler les problèmes irrésolus « de nature fondamentale ». Ceci, à la fois afin de coopter d'éminents scientifiques de la recherche publique tels que Rossby ou Junge, et bien sûr parce que l'étude de l'environnement physique à grande échelle appelle des développements technologiques aux applications militaires comme civils (d'où, de ce côté, la poignée de main donnée à l'industrie). Comme l'a formulé l'historien John Cloud, une grande partie de la recherche des sciences de la Terre d'après-guerre se laisse appréhender une fois que l'on a pris acte du fait que « la plupart de ses participants concevaient leur travail afin d'atteindre les deux objectifs » de progrès fondamental de leur science et de service rendu à la nation. [Cloud ; 2003, pp. 629-630]

La science de la *stratosphère*, sur laquelle nous nous sommes attardé, n'échappe pas à la règle. Son développement dans les années 1940-60 est faite d'incessants va-et-vient entre une science finalisée, très compétitive (entre nations) et souvent opaque, se faisant souvent au sein d'un programme militaire, et des collaborations présentées comme "pacifiques", car concernant des questions plus "fondamentales". Si les collaborations entre les deux Blocs sont entravées (n'oublions pas que l'étude de la stratosphère révèle les essais nucléaires de l'ennemi, et que la haute atmosphère possède des enjeux immenses et multiples pour qui veut devenir "maître du monde"), elles sont souvent stimulées par les scientifiques eux-mêmes, qui sont tout de même imprégnés d'une idéologie internationaliste chère à leur

[199] Les historiens n'ont bien sûr pas décrit l'élite des scientifiques de l'atmosphère des Etats-Unis de la Guerre froide comme des va-t-en-guerre. Mais, R. Doel et J. Howe ont montré que, pour la grande majorité de ces acteurs, l'apport de financements passait, de fait, avant les inquiétudes sur l'escalade technologique à l'arme la plus destructrice possible et sur la possibilité éthique de mêler science et armée. Ces inquiétudes « étaient largement reportées dans le futur » (« à l'exception du cercle étroit mais influent des chercheurs discutant sur l'héritage de la bombe atomique », précise R. Doel). De tels obstacles moraux pouvaient facilement être ignorés, et même la morale demeurer parfaitement sauve, dans un contexte où l'ennemi était violemment stigmatisé dans les discours des élites politiques et la presse. [Doel, 2009, pp. 142-147 ; Howe, 2010 ; Dahan & Pestre (Dir.), 2004]

communauté, ainsi que du désir de faire progresser un champ, l'aéronomie, auquel bénéficierait grandement un maillage global plus resserré des télé-instruments au sol et une coopération spatiale forte.

La science de l'*ozone stratosphérique*, plus particulièrement, s'est quant à elle beaucoup appuyée sur des fonds non-belligérants. La petite communauté de l'ozone a su notamment faire fructifier son programme grâce à l'AGI. La présence de S. Chapman parmi les têtes pensantes de l'AGI, et l'appui logistique et technique fourni par l'IO3C (1948-…) de G. Dobson ont été déterminants. Plus décisif encore a été l'acte de convaincre la jeune OMM, dont le « globalisme infrastructurel » était dans l'ADN, de s'impliquer dans l'AGI et de soutenir le programme d'ozone. Aux yeux des concepteurs de l'AGI et aux yeux de l'OMM, ce programme possédait quatre hautes vertus : (i) après une période d'abandon des échanges entre 1939 et 1945, la petite communauté de l'ozone était en demande d'un réseau à l'international, à la faveur de la paix (relative) retrouvée ; (ii) les instruments qu'il requerrait étaient disponibles à faible coût (les spectromètres ne sont pas des satellites !), et l'implantation aux pôles, lieu stratégique de l'AGI, était tout indiquée pour eux ; (iii) le programme se présentait comme dépourvu d'application directe pour les militaires et, plus généralement, ne faisait courir aucun risque de tension géopolitique ; (iv) à la faveur des dernières études, il s'insérait dans un champ d'étude sur la circulation générale.

S'il existait, à la limite, un enjeu géopolitique au programme d'ozone, c'était dans le fait même de faire coopérer des scientifiques de l'Est et de l'Ouest. Sur ce point, on ne peut pas dire que l'ozone ait été un modèle de réussite. Le principal problème vint, semble-t-il, à court terme, d'échanges épistolaires un peu lents entre diplomaties états-unienne et soviétique, lors des préparatifs de l'AGI ; mais, sur le moyen terme, le principal écueil vint indubitablement de la différence de types d'appareils utilisés en Occident et en URSS. Il faudra attendre la fin des années 1960 pour qu'un débat fructueux s'initie afin de trouver un compromis. Nous avons souligné le rôle joué en ce sens par Rumen Bojkov.

Une dernière forme de coopération s'esquisse au cours des années 1950-60 : les coopérations sur les transports à moyenne échelle du dioxyde de soufre. Ce dernier est alors le principal polluant incriminé, à la fois de corrompre l'air des villes et d'acidifier les précipitations. Si Rossby ne semble pas avoir voulu s'attaquer aux impacts des pollutions industrielles au SO_2 lorsqu'il fit monter l'EACN en 1953, d'autres scientifiques ont déjà nécessairement cette idée en tête. Le SO_2 est connu de longue date comme un facteur d'acidification des pluies (que documente déjà Robert Angus Smith dans Smith, 1872, par exemple) ; dans les années 1950, suite notamment aux inquiétants smogs spectaculaires de Londres et Donora, auxquels la

contribution des émissions de SO_2 est attestée, plusieurs scientifiques nord-américains et européens commencent à documenter le trajet à longue distance du soufre industriel.

Au-delà de la mise en réseau des instruments et des hommes pour comprendre les pluies acides, se dessine *une nouvelle manière de faire de la recherche en sciences de l'atmosphère. Alors que le grand lieu de tensions / échanges se faisait dans les années 1940-60 entre sciences universitaires de la Terre et sciences militaires, il se déplace au cours de la décennie 1970 vers l'interface sciences universitaires / industries et technologies polluantes*.

Reconfigurations disciplinaires

Notre dernière conclusion portera sur les champs d'étude impliqués dans les sciences de l'atmosphère à grande échelle que nous avons analysés dans cette Partie A – sur la stratosphère et les pluies acides.

Premier constat : ce sont des physiciens de formation (météorologistes, géophysiciens, astronomes) qui font la science de la stratosphère, toute la science de la stratosphère. Y compris, donc, la chimie de la couche d'ozone. Non seulement les travaux sont publiés dans les revues traditionnelles des météorologistes, des géophysiciens et des astronomes, mais les chimistes brillent par leur absence. A l'inverse, les premiers travaux de chimie troposphérique urbaine proposées dans les années 1950-60, principalement autour du smog photochimique de Los Angeles, sont produits principalement par des chimistes de formation (A. Haagen-Smit, Harold Johnston, John Seinfeld), et occuperont seulement une petite place dans les journaux de météorologie (pourtant, il s'agit toujours dans ce cas de théoriser dans un même mouvement chimie *et* transport des polluants).

La diversité des chercheurs impliqués dans les études sur les pluies acides est plus importante. On y retrouve, d'abord, des atmosphériciens. Il s'agit principalement de météorologistes ; mais, un nombre croissant d'entre eux commence à mesurer l'importance des réactions chimiques atmosphériques dans la description du devenir des composés atmosphériques (Crutzen, Rodhe), comme le font déjà des spécialistes des atmosphères planétaires comme Lovelock (voir Partie B). On y trouve, ensuite, des agrochimistes (Egnér, Eriksson ; Odén), des limnologiste tels que Gorham, ou encore l'écologue et biogéochimiste des forêts et des écosystèmes aquatiques Likens. Certains spécialistes précoces des transports du SO_2 et des NO_x à grande échelle et des cycles biogéochimiques du soufre et de l'azote, comme Eriksson et ses collaborateurs (Rodhe, Bolin), continueront leurs travaux sur la troposphère à grande échelle. Ils mèneront des travaux importants de chimie atmosphérique à grande échelle, en particulier autour des échanges d'ozone entre troposphère et stratosphère. Nous les retrouverons, eux ou leurs "disciples", dans les années 1990-2000, alors

qu'ils contribuent activement à faire entrer la chimie troposphérique dans l'expertise sur le changement climatique (Partie C).

Comme nous le discutons dans la Partie B (la structure de ladite partie en atteste), les conflits et associations disciplinaires sont centraux pour comprendre la controverse scientifique sur la destruction anthropique de l'ozone aux Etats-Unis dans les années 1970. Nous avons déjà rencontré des acteurs qui joueront un rôle majeur dans cette controverse : le chimiste H. Johnston ; le météorologiste R. Scorer ; l'aéronome P. Crutzen. Si nous voulions continuer à adopter le champ lexical de Thomas Kuhn, auquel nous avons "emprunté" le mot « paradigme » dans notre titre de la Partie A, nous décririons la Partie B comme suit : dans les années 1970, la science de l'ozone va « entrer en crise » ; afin de "résoudre" cette crise, un renouvellement social va s'opérer.

Partie B. *1970-84*. La controverse sociotechnique états-unienne sur la destruction de l'ozone

> « Si des études donnent des preuves que les chlorofluorocarbones ne peuvent pas être utilisés sans menace pour la santé, DuPont arrêtera la production de ces composés ».
>
> Un scientifique de l'industrie DuPont, devant le Congrès des Etats-Unis, en 1974

Comme nous l'avons montré dans la Partie A, jusqu'aux années 1960, les champs de l'aéronomie chimique et de la photochimie des atmosphères planétaires demeurent l'apanage presque exclusif des physiciens-astronomes. Ces disciplines ne sont guère étoffées sur le plan théorique. Elles demeurent donc ouvertes aux non-spécialistes, tels que les météorologistes, les géophysiciens, les chimistes (nous verrons que ceci permettra à un chimiste de laboratoire, Halstead Harrison, de s'essayer à la photochimie des atmosphères globales, avant de réaliser en 1970 la première publication sur la destruction anthropique de l'ozone). Mais, malgré cette facilité d'accès, et nonobstant le dynamisme de l'aéronomie, rares sont les chercheurs qui s'investissent dans la chimie de l'ozone stratosphérique au cours des vingt-cinq premières années de la Guerre froide. Les enjeux de la recherche sur la chimie de l'ozone demeurent alors faibles pour les militaires, les Etats et les industriels, qui financent en priorité la recherche finalisée (par exemple, en ce qui concerne la moyenne et haute atmosphère, l'optimisation de la force militaire stratosphérique et spatiale, ou des télécommunications).

Dans les années 1960, les acteurs impliqués dans les sciences de l'atmosphère globale ou à grande échelle, qui sont des géophysiciens, des aéronomes et des scientifiques des atmosphères planétaires – et donc presque tous des physiciens de formation –, concentrent l'essentiel de leurs rares études troposphériques à la mesure des concentrations en gaz NO_2, SO_2 ou O_3, afin d'estimer leur radiatif régional et à grande échelle. Mais, les réactions

troposphériques entre polluants gazeux et autres gaz réactifs, naturels ou anthropiques, ou particules solides et liquides gaz, sont presque systématiquement étudiées, depuis les années 1950, en lien avec les phénomènes de smog urbain, c'est-à-dire des aspects *locaux ou régionaux* (hélas, les résultats sont très divergents, plus disparates que pour la chimie stratosphérique, pour laquelle des schèmes plus simples suffisent à expliquer le phénomène de renouvellement de l'ozone stratosphérique). En ce qui concerne les réactions hétérogènes (*i.e.* entre phases différentes – de liquide, solide, gazeuse), elles ne sont pratiquement pas étudiées. De manière générale, estimer la vitesse de formation et de destruction dans l'atmosphère des oxydes d'azote et de soufre et de l'ozone troposphérique demeure une tâche ardue, en particulier à moyenne et grande échelle. Quant au CO_2, le gaz "global" le plus étudié, il est presque inerte chimiquement ;[200] et, le CO est peu réactif.

La chimie stratosphérique, elle aussi, demeure peu élaborée. Dans les années 1950-60, les études sur la stratosphère sont dans leur grande majorité centrées sur le bilan radiatif et le climat terrestre. La part de la stratosphère (O_3, aérosols soufrés) dans le bilan radiatif global constitue un facteur climatique non négligeable ; mais, le développement d'une chimie stratosphérique complexe ne semble pas nécessaire pour en rendre compte, et la plupart des études portent sur les variations saisonnières des stratosphères polaires 'per se' (dans la lignée des travaux de Dobson et de l'IGY – ainsi, les travaux d'Harry Wexler (Wexler, 1959), ceux de Dobson (Dobson, 1966), ceux d'Hurd Willett du MIT (Willett, 1965 & 1968), ceux d'Alt (Alt, 1960), *etc.* [Willett, 1968]), et sur les aérosols. Ainsi, l'étude avidement citée des « effets possibles de l'éruption du Mont Agung (Bali) de 1963 sur la stratosphère », publiée en 1971 par des chercheurs de la NOAA, vise-t-elle exclusivement à corréler émissions d'aérosols et température de la stratosphère [McInturff *et al.*, 1971].

Notre Partie A a fait l'histoire de la construction épistémologique d'une couche d'ozone en équilibre. Elle a également montré que les scientifiques avaient fait apparaître de premières fêlures dans l'ossature de l'environnement global. Dans le cas du changement climatique, il s'agit déjà d'études conçues pour estimer les impacts de l'homme sur le climat. Par contre, la complexification épistémologique – dynamique, voire chimique – de la stratosphère ne laissait guère présager une alerte environnementale.[201] Pourtant, l'hypothèse d'une

[200] *Cf.* les intrigantes courbes d'augmentation des concentrations de CO_2 de C. Keeling, les travaux d'Elsasser (Elsasser, 1942 & 1960, ceux d'Atwater M. (Atwater 1966 & 1968), ou encore ceux de Bornstein (Bornstein , 1968). Autre gaz à effet de serre puissant, le méthane ne fera pas l'objet de tels travaux systématiques à grande échelle avant la fin des années 1970.

[201] … Même si nous avons montré dans le Chapitre 2 que, rétrospectivement, il est possible de montrer que, "ironiquement", ce furent les sciences pour la guerre, qui avaient pour premier objectif de défendre les technologies humaines (militaires, principalement) *contre* leur environnement, qui accouchèrent fortuitement de *conditions nécessaires* à la première alerte à la destruction de la couche d'ozone, c'est-à-dire de conditions nécessaires à la première alerte à la destruction d'un patrimoine environnemental global (ce qui allait susciter une première gouvernance internationale

destruction de la couche d'ozone par les avions supersoniques allait faire irruption avec fracas en 1970. Et, subséquemment, faire de l'ozone stratosphérique un champ d'étude central des sciences de l'atmosphère – à la fois la locomotive et la vitrine médiatique de la "sous-discipline" chimie atmosphérique, qui acquerra un statut de discipline universitaire au cours des années 1980.

Rien ne laissait augurer, non plus, de la violence des controverses sociotechniques sur la destruction anthropique de l'ozone stratosphérique, dans les années 1970, aux Etats-Unis. Nous tentons, dans cette Partie B, de lui fournir plusieurs explications :

1. L'arrivée à plus grande maturité de *communautés disciplinaires* travaillant sur l'atmosphère, et qui viennent de manière décisive s'inviter dans l'étude de la stratosphère : des scientifiques des atmosphères planétaires (Richard Stolarski, Mike McElroy, Ralph Cicerone, *etc.* – on peut aussi y inclure Halstead Harrison) ; et, surtout, des *chimistes* – soit des théoriciens de la chimie de la troposphère étudiant le smog (Harold Johnston), soit des chimistes de laboratoire (H. Harrison, Mario Molina, Sherwood Rowland).
2. Une mutation *culturelle* (plus ou moins internationale), « l'invention politique de l'environnement global », à laquelle les scientifiques de l'atmosphère vont enfin participer – parfois "malgré eux" – activement avec l'affaire de l'ozone, alors que d'autres communautés scientifiques s'étaient déjà investies de manière beaucoup plus active auparavant [Mahrane *et al.*, 2012]… Une mutation culturelle avec, parallèlement, tout son lot de *transformations des pratiques* pour les scientifiques de l'atmosphère impliqués dans la controverse de l'ozone, qui apprennent à être des "*experts environnementaux*", au sein du *nouveau « régime des sciences » en getation* [Pestre, 2003 & 2007 (1)]. Dans les années 1950-60, il était 'mainstream' de voir l'atmosphère comme un lieu à dompter (ce qui ne signifie pas que des auteurs du sérail du complexe universitaire-militaire-industriel ne puissent pas avoir donné une impulsion dans le sens d'une plus grande écoute des dérèglements environnementaux, même à grande échelle) ; dans les années 1970, par contre, un tel programme atmosphérique "environnemental" est en passe de devenir 'mainstream' – tout le moins, dans un premier temps, aux Etats-Unis.
3. Une situation *nationale particulière aux Etats-Unis*, où le programme de flotte d'avions supersoniques civils lancé en 1963 était devenu un gouffre financier à

sur l'atmosphère – processus que nous expliquons dans cette Partie B et le Chapitre 7 de la Partie C). En outre, s'ils ne sont pas liés à la recherche militaire au moment où ils réalisent leurs travaux sur l'ozone, au tournant des années 1970, les théoriciens de la destruction anthropique de l'ozone Harrison et Johnston s'appuieront sur des travaux presque tous réalisés à l'aide de budgets belligérants.

la fin des années 1970. Et, un pays où des mouvements citoyens s'organisaient pour la protection de l'environnement. Par exemple, contre les risques de cancers et de maladies respiratoires (les années 1960-70 sont à la fois celles de smogs répétés à Los Angeles et d'alertes contre les effets du tabagisme). Mais aussi, contre l''hybris' des grands projets technologiques, remugles de la Guerre froide. A ce propos, le fait que la conquête technologique de la stratosphère par des technologies fût devenue, au moins partiellement, *civile* (avions supersoniques de ligne, navettes spatiales), galvanisa la société civile, bien décidée à faire valoir son droit à la transparence des informations, dont on la privait par ailleurs au sujet, par exemple, de la Guerre du Vietnam (1955-75).

Après avoir étudié l'ozone stratosphérique d'une manière principalement "désintéressée", "en astronomes" (Partie A), et avant de nous consacrer à l'ère des grands récits sur les déséquilibres physico-chimiques globaux professés par des groupes d'expertises internationaux soutenus par l'ONU (*cf.* les 'Ozone Assessments', les rapports du GIEC, les 'Millennium Ecosystem Assessments', *etc.*) (Partie C), nous décrivons dans cette Partie B les débats houleux qui eurent lieu au cours de cette accélération de l'histoire que fut la controverse sociotechnique sur l'ozone aux Etats-Unis dans les années 1970. Ils révèlent que, alors que de profondes remises en question du modèle politico-économique sont formulées dans certaines sphères académiques (Club de Rome, écologues derrière *Only One Earth* (Ward & Dubos, 1972), pétitionnaires du texte *A Blueprint for Survival* (1972)), peu de scientifiques de l'atmosphère emboîtent le pas, préférant se limiter à une action technocratique, où les problèmes environnementaux sont gérés au cas par cas et sur le court terme (plutôt que d'alerter, comme de plus nombreux scientifiques de l'atmosphère le font aujourd'hui, sur les risques de limites d'absorption des pollutions par l'environnement, sur les risques d'événements environnementaux extrêmes, et sur les impasses de gouverner les pollutions au cas par cas… ce que les scientifiques font, précisons-nous, aujourd'hui, en assumant plus volontiers leur pouvoir politique et en s'adressant à une sphère plus large que la sphère des décisionnaires d'Etat).

Nous nous focaliserons sur les questions relatives à la réactivité chimique de la couche d'ozone, mais sans perdre de vue les autres événements marquants des sciences de l'atmosphère qui se déroulent à la même époque, dans les années 1970-85 (reflux de l'ingénierie atmosphérique, montée du changement climatique, politiques des pluies acides et des smogs). Il s'agit pour nous, plus généralement, de montrer comme s'articulent science de l'atmosphère et "tournant environnemental" (pour laisser derrière eux la science atmosphérique "offensive" des années de guerre).

Mais, bien sûr, la nouvelle manière de voir l'atmosphère globale et de pratiquer les sciences de l'atmosphère n'ira pas sans controverses. Nous les traitons ici d'abord sous l'angle des alliances et des conflits entre communautés disciplinaires. Nous avons en effet pris le parti de diviser notre Partie B d'après les trois principales *communautés disciplinaires* impliquées dans les controverses sur l'ozone dans les années 1970 (puis, dans la foulée, dans la création d'un champ d'étude à part entière sur la Chimie de l'atmosphère globale). D'abord, des *chimistes*, qui s'attaquèrent pour la première fois à la question de l'action des polluants humains sur la composition chimique de la stratosphère, mais n'en furent pas moins ceux qui jouèrent le rôle décisif de lanceurs d'alerte à la destruction de la couche d'ozone par les avions supersoniques (1970-71) et les CFC (1974) (Chapitre 4). Ensuite, des *météorologistes* et le *géochimiste* James Lovelock qui, parmi les détracteurs de la théorie de la destruction anthropique de l'ozone par les CFC, tancèrent lesdits chimistes, leur reprochant leurs pratiques scientifiques et d'experts-militants (Chapitre 5). Enfin, des *aéronomes* et des *scientifiques des atmosphères planétaires*, qui soutinrent pour la plupart rapidement les hypothèses de destruction anthropique de l'ozone. Les premiers endossèrent ensuite pour certains le rôle de chef de file de la chimie de l'atmosphère globale en devenir (P. Crutzen, M. Nicolet) ; les seconds s'insérèrent pour certains dans le juteux programme sur l'ozone remporté par la NASA en 1976 (Chapitre 6).

Chapitre 4. Des chimistes lanceurs d'alerte

Comme nous venons de l'indiquer dans l'introduction générale à la Partie B, l'hypothèse d'un changement climatique lié aux émissions anthropiques de CO_2 et d'aérosols fait de brèves apparitions dans la presse généraliste dès le tournant des années 1950 (aux Etats-Unis, notamment). Et, au cours des trois décennies qui suivent la Seconde Guerre mondiale, une part croissante des géophysiciens et des scientifiques de l'atmosphère prend l'hypothèse au sérieux. Toutefois, l'heure n'est pas encore à un consensus scientifique large sur l'existence d'un risque climatique. Dans les années 1960 et au début des années 1970, les scientifiques avancent calmement leurs arguments, sans susciter, ni remous dans la communauté scientifique, ni tumulte médiatique. Le rôle radiatif des aérosols et la capacité des océans à capter le CO_2 atmosphérique invitent à la circonspection. Mais, une telle prudence confine souvent à l'indifférence, s'agace notamment Guy Callendar (1898-1964). Lui qui a intégré le sérail des théoriciens précoces de l'effet de serre anthropique à la fin des années 1930 (*cf.* Callendar, 1938) n'a pas pour intention de se muer en lanceur d'alerte au changement climatique ; par contre, il ne peut que déplorer le fait que l'une des raisons pour lesquelles son article de 1961 dans le *Quaterly Journal* a été mal accueilli tient au fait que « le CO_2 comme cause de changement climatique […] passe par-dessus la tête de presque tous les auteurs sur le sujet, pour qui il ne s'agit que de spéculations ('speculation') parmi d'autres, à mettre au même niveau que les effets soleil-u.v.-ozone », écrit-il. Au début des années 1960, la plupart des géophysiciens demeurent en effet ralliés à la vision d'un climat global et d'une couche d'ozone en équilibre, insensibles aux perturbations anthropiques. [Fleming, 2007(c), pp. 71-83 ; Callendar, mars 1964, "personal note" **in** Fleming, 2007(c), pp. 82-83]

Dans ce contexte, Boeing obtient en 1963 une enveloppe conséquente d'argent public afin de développer une première grande flotte d'avions supersoniques (SST, 'supersonic transport') de ligne (jusqu'alors, les avions supersoniques existants étaient militaires). Ces engins sont destinés à voler dans la basse stratosphère. En 1970, on estime que la flotte états-unienne comptera à terme cinq cents engins, et celle des autres pays, trois cent cinquante appareils environ [Harrison, 1970, p. 734]. A la lecture de ces chiffres importants, quelques chercheurs s'interrogent sur les impacts environnementaux à attendre de ces vols. Ainsi, dans les années 1960, alors que de premiers prototypes d'avions civils évoluent dans la stratosphère, la NAS commande des estimations de l'impact climatique global que pourrait avoir une flotte importante de SST. Toutefois, il faudra attendre la "fuite", en 1969, d'une note de service d'un chimiste de Boeing, Halstead Harrison, faisant l'hypothèse d'une possible

destruction d'ozone par les gaz émis par les avions supersoniques, pour que les recherches scientifiques sur les impacts des vols ne s'activent. Et pour que, avec elles, les études sur la chimie de la stratosphère, et plus généralement la chimie de l'atmosphère, ne prennent une dimension nouvelle.

Harrison, nous le verrons, ne cherche pas à alerter les Américains. D'autres scientifiques, en revanche, pensent que l'homme est en capacité de détruire facilement l'ozone stratosphérique par l'épandage de "déozoniseurs" chimiques *in situ*, ainsi que Sydney Chapman (1934), Harry Wexler (1962), ou encore l'un des membres du 'Scientific Advisory Committee' du Président des Etats-Unis Gordon J.F. MacDonald (1968)[202] l'avaient conjecturé. En 1970 et 1971, ils expriment devant le Congrès états-unien leur conviction que, en conséquence, les SST puissent modifier (faiblement) le climat de la stratosphère, la température de l'atmosphère globale ou même exposer l'homme à des risques de cancers inhérents à un afflux accru d'UV-B. Le fait que l'avion de Boeing fût une technologie civile l'exposait à une exigence citoyenne de transparence potentiellement plus importante que celle quémandée au sujet des SST militaires. De plus, la quantité d'engins qu'il était question de faire voler, ceci à une fréquence importante, faisait des premiers de plus gros pollueurs que les seconds. *Toutefois*, comme l'ont montré de nombreux auteurs (Ian Clark, Edward Parson, Mel Horwitch, Erik Conway), l'alerte environnementale à la destruction de la couche d'ozone qui émergea dans l'arène politique à la fin de l'année 1970 fut un facteur moins décisif que la substantielle rallonge budgétaire que Boeing et ses partenaires venaient de demander au Congrès en vue de mener à bien leur déjà coûteux – mais, certes, prestigieux – programme d'avions supersoniques civils. Le vote du Sénat de mai 1971, qui mettra définitivement fin au projet de SST états-unien, devra beaucoup plus à ce facteur économique qu'à l'alerte à la destruction de l'ozone (qui ne fut peut-être pas même le facteur environnemental le plus important, puisque les menaces de 'sonic booms' répétés mobilisèrent au moins autant les élus et la société civile que la protection de la couche d'ozone). [Clark, 1974 ; Parson, 2003, pp. 26-31]

[202] En 1968, alors qu'il est membre du 'Scientific Advisory Committee' du Président Johnson et 'Professor' à l'Université de Californie, le géophysicien Gordon James Fraser MacDonald publie un article, dans lequel, à la manière de Wexler au tournant des années 1960, il met en garde contre de nouvelles technologies de guerre « environnementales ». Parmi elles, on retrouve, comme chez Wexler, la possibilité de créer un trou de la couche d'ozone. MacDonald déclare :

> "The ozone is replenished daily, but a temporary 'hole' in the ozone layer over a target area might be created by physical or chemical action." [Gordon J. F. MacDonald, 1968, "How to wreck the environment" **in** *Unless Peace Comes, A Scientific Forecast of New Weapons*, Nigel Calder (Ed.), The Penguin Press, pp. 165-183, **in** Grevsmuehl, 2014 (à paraître), p. 9]

Le caractère décisif des doutes sur la rentabilité du projet est bien documenté dans la littérature de sciences humaines et sociales sur la controverse des SST en 1970-71. Les auteurs sont par contre plus discrets au sujet de la construction scientifique de l'alerte à la destruction d'ozone. Ils négligent notamment souvent de mentionner les différences entre les formations disciplinaires des scientifiques. Or, arguons-nous, les *chimistes* de laboratoire (H. Harrison) et de la troposphère (Harold Johnston), acteurs nouvellement arrivés – pour des raisons diverses, que nous expliciterons – à l'étude de l'ozone stratosphérique au tournant des années 1970, vont jouer les premiers rôles dans le lancer d'alerte de 1970-71 sur la destruction anthropique de l'ozone par les SST. Puis, le phénomène se reproduira en 1974 au sujet des CFC (avec les chimistes de laboratoire Sherwood Rowland et Mario Molina). Ce sont ces chimistes qui donnèrent le coup de grâce à l'idée d'une stratosphère chimiquement et physiquement en équilibre, déjà affaiblie par des aéronomes, des géophysiciens et des météorologistes du complexe universitaire-militaire-industriel au cours des décennies 1940-60 (comme montré dans le Chapitre 2). Face à la possibilité d'une destruction anthropique de l'ozone stratosphérique, le chimiste H. Johnston, par exemple, fera montre d'une attitude toute différente des physiciens-aéronomes. En tant que scientifique étudiant habituellement les mécanismes de formation des smogs photochimiques dans la troposphère, il n'a pas de raison 'a priori' de voir la couche d'ozone comme une entité géologique immuable, inexpugnable. Sillonnée par des avions supersoniques, elle est à ses yeux vulnérable à de potentiels changements de régimes chimiques, comme le sont les atmosphères de villes très polluées telles que Los Angeles.

De plus, en tant que chimiste des pollutions élaborant des normes de qualité de l'air, H. Johnston a conscience de son pouvoir politique. En particulier, il sait que les alertes sanitaires peuvent être des arguments politiques puissants (d'où sa mise en garde contre les UV « sévères », contre le risque de cécité). Ils ont la double vertu de montrer le danger comme proche dans le temps et comme proche dans l'espace, jusqu'à l'échelle de l'individu, jusqu'à l'échelle de quelques années de vie. En retour, regarder en détail le profil et les discours des lanceurs d'alerte révèle que, si la patrimonialisation du non-humain environnemental "couche d'ozone" fut rapidement effectuée par certains chimistes lanceurs l'alerte et leurs soutiens, l'alerte sanitaire inhérente à la destruction de l'ozone n'était pas nécessairement liée au "tournant environnementaliste", au contexte de préparation de l'UNCHE de Stockholm (1972). Les lanceurs d'alerte mettent ainsi presque exclusivement ce risque sanitaire en avant, parfois de manière certes très catastrophiste (*cf.* J. McDonald ou le premier brouillon de l'article de 1971 de Johnston), mais tout en semblant parfaitement sourds aux discours des Limites, de la compétition homme/nature, de critique de l'accroissement des technologies industrielles, *etc.* qui prolifèrent à cette période. Cette

attitude peut en partie être imputée à leur volonté de ne pas perdre leur légitimité d'expert, en donnant du grain à moudre à ceux qui seraient tentés de les taxer d'environnementalistes déguisés en scientifiques ; mais, nos analyses et celles de Howe, 2010, notamment, indiquent que les atmosphériciens du tournant des années 1970 sont, de manière générale, étrangers à ces mutations culturelles (contrairement aux écologues de *Only One Earth* [Ward & Dubos (Ed.), 1972], par exemple). Par contre, on observe dans le même temps, dès 1970-71, des acteurs de la société civile qui font de la pollution stratosphérique un nouvel emblème de l'hybris technologique (… alors que, dans le même temps, plus prosaïquement, des politiciens agitent le risque de catastrophe environnementale afin d'accélérer l'abandon d'un programme SST dont ils ne veulent déjà pas pour des raisons économiques).

Ce chapitre est consacré aux chimistes lanceurs d'alerte sur l'ozone, aux Etats-Unis, au début de la décennie 1970. Dans un premier sous-chapitre, nous décrivons le rôle de H. Harrison et H. Johnston dans la controverse sociotechnique sur les SST en 1970-71 (Nous analysons les controverses sur l'action des CFC et des navettes spatiales sur l'ozone dans les Chapitres 5 et 6, respectivement). Nous décrivons le processus d'apprentissage du travail d'expert au cœur de cette courte et violente controverse, et mettons l'accent sur les contingences et la complexité qui la caractérisent. Elle ne saurait, en effet, se résumer à un débat d'experts sur la destruction de l'ozone, ni à un clivage entre camps républicain et démocrate. Dans une première Section, nous faisons le récit du cheminement du chimiste Halstead Harrison, de Boeing, vers la chimie stratosphérique et l'hypothèse d'une destruction de la couche d'ozone par les SST ; puis, nous discutons la stratégie adoptée par Boeing, gêné aux entournures par les résultats de son chimiste. Dans les deux sections suivantes, nous discutons le rôle de scientifiques-experts James McDonald et Harold Johnston dans les arènes politiques et médiatiques, et expliquons pourquoi la controverse sociotechnique sur la destruction anthropique de l'ozone fut cadrée durablement comme un problème de santé publique. La quatrième section explique les raisons multiples de la décision du Congrès états-unien d'abandonner le financement du programme SST. Quant à la dernière section, elle typifie l'expertise sur l'ozone qui fut alors "utilisée" dans les débats parlementaires et dans l'arène médiatique. Nous montrons que Halstead Harrison et Harold Johnston peuvent être vus comme des lanceurs d'alerte "malgré eux", dans un premier temps, car leurs travaux avaient "fuité" dans la presse (ce qui ne signifie pas que H. Johnston ne promut pas ensuite activement la protection de la couche d'ozone). En outre, nous soulignons que le rôle des experts de l'ozone fut mineur dans l'abandon définitif du projet de SST par le Congrès. Et que, par ailleurs, les enjeux de compétitivité et le prestige de

l'Industrie et de l'économie nationales influèrent fortement sur le degré de confiance accordé aux expertises scientifiques par les décisionnaires.

Dans un second Sous-chapitre, nous mobilisons le parcours scientifique de H. Johnston afin d'expliquer la genèse de son travail de 1971, et le fait qu'il lançât l'alerte tout en étant étranger – ou tout le moins plutôt indifférent à – la culture "environnementaliste globale" qui se développait alors. Puis, nous montrons la filiation entre H. Johnston, d'une part, et S. Rowland et M. Molina, d'autre part, les deux lanceurs d'alerte à la destruction de la couche d'ozone par les CFC (*cf.* Molina & Rowland, 1974), eux aussi chimistes. Le lecteur magnanime nous pardonnera les redites qui subsistent dans ce Chapitre 2 ; elles découlent, *en partie*, de l'adoption d'un tel plan.

4.1. La controverse sur les avions supersoniques aux Etats-Unis (1970-71)

Comme nous l'avons exposé dans le chapitre précédent, des études sur des phénomènes stratosphériques de faible ou moyenne temporalité ont été initiées entre les débuts de la Seconde guerre mondiale et le début des années 1960, dans un cadre fondamentalement belligérant. Faisant principalement état de la situation de la recherche nord-américaine, à l''Arctic Meteorology Research Group' de son Université McGill (Montréal), au 'Defense Research Board of Canada' et au 'Cambridge Research Laboratories' de l'US Air Force, le Professeur Kenneth Hare introduit ainsi son long article de 1962 sur « la Stratosphère » : « Au cours des cinq dernières années – depuis le début de l'Année Géophysique Internationale –, l'attention des météorologistes s'est portée de manière croissante sur la stratosphère. Une grande partie des fonds de recherche disponibles ont été détournés vers l'étude des hauts niveaux atmosphériques ». « Le moteur de ce travail n'a pas été uniquement la quête de découverte scientifique », poursuit l'auteur. La stratosphère « est un réservoir dans lequel les débris des explosions nucléaires ont été injectés en vaste quantité depuis 1945 », « et c'est en grande partie depuis ce réservoir que des retombées [radioactives] se produisent ». Outre les essais nucléaires, il existe une autre raison d'encourager le développement des études sur les perturbations dynamiques de la stratosphère, ajoute-t-il : des avions de plus en plus nombreux sont amenés à sillonner le ciel aux moyennes altitudes, en émettant une quantité croissante de gaz et de particules. K. Hare mentionne « les gros avions de ligne à réaction », qui volent autour de 11-12 kilomètres d'altitude, les « avions expérimentaux et militaires », qui s'élèvent jusqu'à 80 kilomètres, et enfin « la prochaine génération « d'avions supersoniques » américains et européens, « qui

promet de relier l'Europe à l'Amérique du nord en deux ou trois heures, en atteignant certainement la couche entre 10 et 15 kilomètres, voire des altitudes supérieures ». [Hare, 1962, p. 525]

Toutefois, si K. Hare admet que la recherche stratosphérique « embrasse à présent de nombreuses sciences », il se focalise presque exclusivement sur « la circulation de la stratosphère », en partie « parce que la recherche personnelle de l'auteur porte sur ce champ très vivant », mais « surtout parce que la recherche dans le domaine a été, juge-t-il, le lieu des plus importantes innovations de la dernière décennie » [Hare, 1962, p. 525]. Et, dans son long article, K. Hare n'évoque pas la possibilité de mutations chimiques dans la stratosphère. D'autres – rares – physiciens vont par contre proposer des hypothèses de destruction photochimique de l'ozone stratosphérique par les émissions gazeuses issues des navettes et des avions supersoniques dès la première moitié des années 1960, dont Wexler (1962) et Hampson (1965) (voir Chapitre 2). Toutefois, les quelques rares études des années 1960 sur les conséquences "environnementales" de l'aviation portent alors, non sur la destruction de la couche d'ozone, mais sur les impacts climatiques (voire météorologiques), régionaux et surtout globaux, de l'aviation, qui seraient induits, soit par l'émission de gaz à effet de serre par les avions, soit par l'effet parasol des trainées d'avions (qui sont constituées de cristaux aqueux solides). Ainsi, « le rédacteur en chef de *Science* relaya dès 1965 l'hypothèse de possibles effets climatiques de la formation de cristaux de glace [stratosphériques par l'aviation] », rapporte Ian Clark, un sociologue ayant analysé en détail la controverse. En outre, la vapeur d'eau des SST était incriminée en tant que gaz à effet de serre. Par exemple, relate l'historien Erik Conway, Manabe et Wetherald avaient estimé un réchauffement global de 2°C dû à la vapeur d'eau qui serait émise par une grande flotte supersonique. En 1970, l'équipe « climat » de Kellogg pour le rapport *Man's Impact…* du MIT jugera peu crédible une telle augmentation ; par contre, la même année, Russel Train réitérera l'alerte de Manabe et Wetherald, au cours d'une audience sur « le développement du transport supersonique devant le 'Subcommittee on Economy in Government of the Joint Economic Committee' du Congrès des Etats-Unis. Et, R. Train mettra en garde : « les SST pourraient affecter la balance calorifique atmosphérique ». Nous y reviendrons. [Clark, 1974, p. 418 ; Conway, 2008, p. 127]

Qu'en est-il, par ailleurs, d'une éventuelle inquiétude au sujet de la possibilité d'une destruction de la couche d'ozone ? Elle est, pour ainsi dire, inexistante alors. Ceci n'est guère surprenant. Dans les années 1960, aucune anomalie durable n'apparait dans les mesures des concentrations moyennes d'ozone stratosphérique (même si Dobson publie, entre 1963 et 1965, de « premiers » travaux sur le « comportement anormal de l'ozone antarctique, au cours de la période 1956-1963 » [Andersen & Sarma, 2002, p. 372]). Pourtant, quelques mois avant les expertises du MIT et de Russel Train, un chimiste de Boeing nommé

Halstead Harrison, a formulé des hypothèses semblables à celles de Wexler et Hampson. Elles portaient sur les potentiels impacts atmosphériques en cas de développement d'une flotte de SST. Selon Harrison, la perturbation de la stratosphère méritait d'être étudiée du fait , de nouveau, de ses répercutions climatiques : les émissions de vapeur d'eau de la flotte prévue induiraient selon lui une diminution de la colonne d'ozone de 3,8%, et subséquemment une augmentation de la température de l'air en surface de 0,04°K, dans l'Hémisphère nord) [Harrison, 1970, p. 734].

L'hypothèse du chimiste de Boeing Halstead Harrison

L'expérience de Halstead Harrison a fait l'objet de peu d'analyses dans la littérature sur l'affaire de l'ozone des années 1970.[203] Pourtant, elle en constitue un événement fondateur et riche d'enseignements. Pour commencer, nous faisons l'histoire de la genèse par Harrison d'une hypothèse de destruction de la couche d'ozone par les SST. Nous l'expliquons par la culture scientifique et les pratiques scientifiques du chimiste de Boeing (première Sous-section). Puis, nous revenons sur l'attitude de l'employeur de Harrison suite à la communication de l'hypothèse de ce dernier, en interne puis en externe (seconde Sous-section).

Chimie, culture "globale" de la Guerre froide et modélisation numérique

Dans un texte autobiographique écrit dans un style familier et versant souvent dans le registre ironique, "Boeing Adventures, with Digressions" (2003), le chimiste états-unien Halstead Harrison raconte son expérience au sein du laboratoire scientifique de Boeing dans la deuxième moitié des années 1960. Il met en exergue quelques enjeux financiers et stratégiques des développements technologiques de l'aviation et des fusées au cours de la décennie 1960. Il affirme que le transfert des financements du programme spatial vers la NASA ne se fit pas sans amertume chez les militaires. Par contre, le développement d'avions supersoniques civils, confié comme nous allons le voir à Boeing, prolongea, sans le concurrencer (au contraire), le programme d'aviation militaire supersonique et stratosphérique, initié aux Etats-Unis et au Royaume-Uni durant la Seconde Guerre mondiale.[204] Pour finir, Harrison se moque volontiers de l'aspect cocardier du projet de SST états-unien. [Harrison, 2003, pp. 2 & 5-6]

---

[203] A titre d'exemple, dans le Chapitre 5 de son ouvrage *High-Speed Dreams: NASA and the Technopolitics of Supersonic Transportation, 1945-1999*, consacré à « l'ozone, le Concorde et les SST », l'historien Erik Conway ne s'attarde pas sur son cas (Conway, 2005).

[204] Quant à la décision des États-Unis d'abandonner la technologie des avions supersoniques, en 1971, elle concernait seulement les avions civils, et ne pénalisa pas le développement industriel des avions supersoniques militaires américains. L'argument environnemental contre les SST tenait au fait que les avions commerciaux voleraient en grand nombre ; par contre, le trafic de SST militaire était amené à demeurer faible donc bénin pour l'ozone.

Mais, Harrison s'attarde principalement sur l'aspect "environnemental" de la controverse, et en particulier le volet concernant la destruction de l'ozone, dans lequel il fut dramatiquement impliqué. L'un des arguments des membres du Congrès états-unien de ne pas voter une rallonge des financements publics alloués à Boeing pour développer ses SST fut en effet la crainte que la constitution d'une flotte civile d'avions supersoniques altérât la couche d'ozone, et provoquât une catastrophe sanitaire (même si nous montrerons que ce risque environnemental n'aurait nullement pu justifier à lui seul l'abandon du programme civil d'avions supersoniques états-unien dès 1971). [Harrison, 2003]

Trois facteurs expliquent selon nous le cheminement de Halstead Harrison vers l'hypothèse d'une destruction de l'ozone : sa culture "globale" façon Guerre froide ; sa formation de chimiste ; l'usage qu'il fit des modèles numériques.

La culture "globale" de Halstead Harrison est indissociable de la culture états-unienne de la Guerre froide. Au commencement de ses travaux, déclarera Harrison, il y a « la Bombe ». Son cheminement vers la science de l'atmosphère à grande échelle est en effet tributaire du développement d'avions et de fusées, chargés de transporter de lourdes bombes à fission et à fusion nucléaires à d'importantes altitudes. De plus, né en 1931, Halstead Harrison a grandi dans une atmosphère de mobilisation – humaine et technologique – des Etats-Unis pour la guerre. Selon ses propres mots, il est venu à la science par « fascination pour la Bombe et pour un 'pork-pie-hatted portrait' de J. Robert Oppenheimer en couverture de *Life Magazine* » (Harrison : "I wanted to look just like that.") [Harrison, 2003, pp. 1-2]. Cette guerre avait été, par ailleurs, mondiale, et réalisée à l'aide de technologies déployées à grande échelle. Harrison a été marqué par cette atmosphère culturelle de "globalisation" des problématiques scientifiques. En sciences de l'atmosphère, on la trouvait dans les tentatives de traçabilité des composés radioactifs éjectés lors des essais nucléaires, ou dans les études sur les effets globaux du gaz à effet de serre CO_2. Chimiste de laboratoire de formation, des rencontres (en particulier, celle de Harold Johnston, dont nous reparlerons) avaient ensuite conduit Harrison à s'intéresser à l'atmosphère.[205] Mais, c'est chez Boeing, qu'il intégrera en 1963, qu'il aura l'occasion d'aborder des questions d'atmosphère globale.

[205] Harrison entre à Caltech en 1949. L'aventure fait long feu – il « échoue », relate-t-il. En 1952, il travaille six mois comme technicien-chimiste, puis neuf mois comme technicien de recherche pour la 'Food Machinery Corporation', en Californie, avant de retourner sur les bancs de l'université, à Stanford, où il obtient un 'Bachelor of Science' de Chimie en 1955. Là, il poursuit son parcours avec un PhD en chimie physique jusqu'en 1960, « avec Harold Johnston », l'autre grand protagoniste scientifique dans l'affaire O_3-SST qui éclatera en 1970-1971. Toutefois, précisons-nous immédiatement, au tournant des années 1960, l'embryonnaire chimie de l'ozone stratosphérique n'était nullement un centre d'intérêt, ni pour l'un, ni pour l'autre. En disciple de Haagen-Smit, Johnston étudiait en priorité la chimie troposphérique liée aux pollutions urbaines. Quant à l'article "Kinetics of the Thermal Decomposition of Nitric Acid Vapor IV: A Shock-Tube Study between 800-1200K" que publièrent ensemble

Au début des années 1960, les Etats-Unis sont le pays le plus en pointe et le plus gros financeur dans le domaine aéronautique.[206] Fait décisif dans notre récit, la vitesse des avions est devenue un enjeu, non seulement pour les bombardiers et ravitailleurs en vol de l'armée, mais aussi pour les avions réalisant des vols commerciaux (c'est l'un des atouts du Boeing 707, l'un des premiers avions commerciaux à réaction, mis en service en 1958). D'une part, parce que l'on considère qu'une planification des vols plus flexible permise par des vitesses plus importantes est avantageuse, en dépit de l'augmentation subséquente des coûts des vols. D'autre part, la vitesse des avions est devenue un enjeu de compétitivité et de prestige nationaux pour les Etats-Unis : vis-à-vis des Britanniques et des Français, qui ont entériné leur projet commun de construction d'un avion supersonique commercial, le 29 novembre 1962 ; vis-à-vis de l'URSS ennemie, qui avait déjà lancé un engin civil pouvant voyager à près de 900 km/h (c'est-à-dire aux allures de croisière des avions de ligne d'aujourd'hui).[207]

En juin 1963, J.F. Kennedy lance le projet de construction d'un appareil de transport supersonique commercial, avec l'objectif affiché, se rappelle Harrison, qu'il soit « supérieur à tous ceux construits dans n'importe quel autre pays du monde » [Harrison, 2003, pp. 2-6 & 21]. Avant de devoir être des champions de la « productivité » par rapport aux avions non-supersoniques, les avions supersoniques incarnent avant tout pour les Etats « le progrès », « le prestige » de leur industrie nationale (tout comme, plus généralement, les technologies aéronautiques & aérospatiales). Comme l'ont montré Kenneth Owen et Erik Conway, ceci est vrai des deux côtés de l'Atlantique. En outre, SST états-unien et Concorde franco-anglais, conçus de manière concomitante, sont le reflet des nouvelles interactions transatlantiques en matière de nouvelles technologies : « la compétition avant tout », comme moteur de l'économie ; des alliances entre groupes anti-technologies polluantes (ici, anti-SST) ; des missions de haut niveau diplomatique ; un espionnage industriel à l'international [Conway, 2005, « Introduction »]

Johnston et Harrison en 1962, il n'a pas de lien direct avec l'atmosphère. En 1960, Harrison rejoint pour deux ans le Laboratoire de Dynamique Générale et d'Atomistique Générale de La Jolla (Californie), pour une durée de deux ans. En 1962, il obtient une bourse post-doctorale de la 'National Science Foundation', pour travailler en collaboration avec l'Université de Michigan et l'"Institut für Angewandte Chemie der Universität' de Bonn. [Harrison, 2003, pp. 2-6]

[206] Au sortir de la Guerre, les technologies d'aviation britanniques rivalisent avec leurs homologues américaines. Le Royaume-Uni développe ainsi le premier avion de ligne à turbo-réacteurs, le 'Comet'. Toutefois, peu après ses débuts, des accidents tragiques se produisent (en 1953 et 1954), inhibant la brillante carrière promise à l'appareil. Quant aux bombardiers rapides tels ceux de la série 'Vulcan', leur coût devient trop important pour le Royaume-Uni. En définitive, beaucoup d'ingénieurs britanniques talentueux émigrèrent alors aux Etats-Unis... Même si, à partir de 1962, le projet Concorde (auquel nous consacrerons une section dans le Chapitre 6) offrit un nouveau programme ambitieux à l'industrie aéronautique britannique.

[207] Néanmoins, le prototype d'avion supersonique civil soviétique, le Tupolev 114, ne dépassera pas le mur du son avant 1969.

La contribution de Boeing à l'effort de guerre américain pendant la Seconde Guerre mondiale est connue. Au sortir de la guerre, l'entreprise fortunée se lance dans le développement de flottes d'avions civils. Elle profite de ses lettres de noblesse et de dévouement acquises auprès de l'Etat fédéral au cours de la guerre pour remporter l'appel d'offres de Kennedy sur les SST. En date du 5 juin 1963, le Congrès s'engage officiellement à soutenir Boeing pour mener à bien le projet. L'aide publique s'élèvera à 60 millions de dollars. Les aides fédérales, et subséquemment le monopole national du projet de développement d'avions supersoniques, seront renouvelés en 1966. Ce choix de l'administration fédérale suscitera l'ironie d'Harrison :

> « En septembre 63, […] Boeing annonça qu'il répondrait à la proposition [gouvernementale] de construire un avion supersonique américain. […] Convair et North American avaient testé de lourds avions supersoniques militaires [(les B-58 and B-70]) [… et] Lockheed était réputé pour ses modèles élégants [… Pourtant, bien que] Boeing n'eût aucune expérience dans les avions supersoniques […, l'entreprise] était dans une bonne passe qui la mena [à remporter] le contrat de construction de deux prototypes de cellule d'avion [supersonique], avec des moteurs de General Electric [, en décembre 66. (En outre, Boeing dominerait] l'industrie du transport aérien global au cours des quatre décennies suivantes. ») [Harrison, 2003, pp. 6-7]

De retour d'Allemagne où il a consommé son contrat postdoctoral, Halstead Harrison accepte, fin 1963, un poste de chercheur au 'Boeing Scientific Research Laboratory' (BSRL) de Seattle. Cette position professionnelle est certes précaire et ne promet pas une grande reconnaissance de ses pairs chimistes, mais lui promet une liberté certaine dans ses recherches.[208] Bien que jugeant le gain de l'appel d'offres sur les SST par Boeing « intéressant » pour elle, l'équipe de recherche qu'intègre Harrison est déjà liée à d'autres tâches, qu'elle poursuit dans les années qui suivent. Le travail de l'équipe porte principalement sur la photo-ionisation des couches électroniques internes du zinc, du cadmium, et du mercure par les UV, ainsi que sur la photo-ionisation dissociatrice de l'eau… études de laboratoire dont on devine, pour certaines, difficilement l'intérêt pour une entreprise aéronautique (Harrison ne nous en dit rien). Elles fourniront, en tout cas, la matière de la majorité des publications de Harrison entre 1966 et 1972 [Harrison, 2008 ;

[208] Harrison :

> "I was treated courteously with a hand-shake promise for a minimum of three years' support in a position that permitted self-directed research. I had no delusions about the stability of aerospace employment. I liked my prospective colleagues and respected my boss, Terry Turner. Accepting, I set up a lab, hired two assistants, invited a friend from Bonn to visit as a post-doc, and got to work to win a Nobel." [Harrison, 2003, p. 6]

Harrison, 2003, pp. 9 & 15]. Par contre, en ce qui nous concerne, l'équipe de Harrison apporte déjà, par le biais desdites études, une contribution indirecte au champ de la physico-chimie de la moyenne et haute atmosphère, puisque la photo-ionisation est, avec la photodissociation, un phénomène atmosphérique provoqué par les rayons UV. Harrison met ainsi un premier pied dans l'aéronomie.

Un nouveau programme, bientôt envisagé par Boeing, va rapprocher décisivement Harrison des questions de chimie atmosphérique globale. Il concerne les atmosphères des autres planètes. « L'idée raisonnable derrière ça, écrit Harrison, était que la 'Boeing Aerospace Division' était en concurrence avec la NASA pour remporter des contrats relatifs à des missions (en suspens) vers Mars et Vénus. L'expertise scientifique de notre entreprise pouvait lui faire marquer des points en vue de les décrocher » [Harrison, 2003, pp. 6 & 10]. Harrison et ses collègues en viennent ainsi à s'intéresser à la composition et à la photochimie des hautes atmosphères de Mars et Vénus, en travaillant d'abord sur le rapport CO/CO_2 (après avoir auparavant travaillé sur les monomères d'acide carbonique au niveau des pôles martiens). Un champ où ils retrouvent entre autres « Mike McElroy » [Harrison, 2003, pp. 10-12]… Harrison publie en 1968 un article intitulé "The Condensation and Sublimation of CO_2 with H_2O: Carbonic Acid on Mars?", co-rédigé avec deux de ses collègues du 'Geo-Astrophysics Laboratory', l'équipe particulière du BSRL à laquelle ils appartiennent (Harrison *et al.*, 1968, *Planetary and Space Science* ; avec D.M. Scattergood et M.R. Shupe)… "Fortuitement", Harrison était devenu un scientifique des atmosphères planétaires et un chimiste de l'atmosphère globale, comme il s'en amusera trente-cinq ans plus tard :

> Harrison: « Je suggérai (comme d'autres le firent aussi) que le X-O [observé] était probablement le radical libre HO, et entrepris d'écrire un modèle photochimique pour les hautes atmosphères de Mars et Vénus, qui combinerait le spectre solaire connu avec les distances orbitales de Mars et Vénus, les sections efficaces d'absorption qui produisent la photolyse du CO_2, et les vitesses de quelques réactions, connues ou estimées ('known or guessed rates'), impliquant H_2O, HO, HO_2, O_2, O_3, CO, HCO et CO_2. Voilà : « Je suis à présent un Photochimiste de l'Atmosphère, alors que six mois auparavant j'étais incapable d'en donner la bonne orthographe. » ('Voilà : "Now I am an Atmospheric Photochemist, and six months ago I couldn't even spell one".') » [Harrison, 2003, p. 12]

Cette conversion vers la photochimie de l'atmosphère peut paraître incroyablement rapide. Mais, comme nous l'avons déjà souligné, la chimie de la stratosphère et des atmosphères planétaires est seulement embryonnaire dans les années 1960.

En outre, Harrison a eu la chance d'avoir accès à des modèles numériques au sein de son laboratoire Boeing. A la fin des années 1960, il faut imaginer Harrison dans son laboratoire de recherche Boeing, en train de « jou[er] dans la gaieté "à la" photochimie informatique ('I was happily playing computer photochemistry') », selon ses propres mots… Et d'ajouter, entre parenthèses : « C'est addictif ('It's addictive') ».

A la même époque, rapportera Harrison en 2003, il devenait par ailleurs « plus au fait de la mobilisation critique qui prenait forme et grandissait, afin de s'opposer aux flottes d'avions supersoniques : « bruyants », « chers », « non rentables » »… En particulier, il avait eu vent d'« inquiétudes environnementales [en provenance de la] communauté scientifique ». Anticipant les contestations du Concorde, poursuit-il, Bo Lundberg « avait forgé l'expression 'boom-bandages' (des "bandages sonores" ?), et était passé à la télévision avec des modèles de globes cruellement emballés [par ces bandages] ». D'autres chercheurs avaient évoqué des impacts sur la composition de la stratosphère. Ainsi, un ami de Harrison, Bob Charlson, avait proposé « que le soufre contenu dans les carburants des SST pourrait augmenter la couche naturelle d'aérosols que l'on trouve vers 20km d'altitude, dans la basse stratosphère [(la couche dite "de Junge")], avec au sol des conséquences significatives sur le climat et l'agriculture. » [Harrison, 2003, pp. 13-14]

Dès 1966-67, parallèlement à son travail sur la condensation et la sublimation du CO_2 en présence de vapeur d'eau sur Mars (Harrison *et al.*, 1968), Harrison s'ingénia alors à adapter à l'atmosphère terrestre le modèle numérique qu'il utilisait pour simuler l'atmosphère de Mars et de Vénus, à l'aide du « mécanisme de Chapman » revu et corrigé par les hypothèses plus récentes de Hampson, de Hunt et de Leovy. Il « y ajouta quelques SSTs, et explora les "what if" »… « Le modèle calcula » qu'un « faible nombre d'avions supersoniques [pouvait] perturber la couche d'ozone de manière significative, du fait de leurs émissions de vapeur d'eau dans la basse stratosphère terrestre », écrit Harrison. [Harrison, 2003, pp. 13-14]

Comme nous l'avons dit, cette hypothèse sera reprise par Russel Train en 1970, et suscitera, comme nous le verrons, des vocations chez d'autres scientifiques, qui élaboreront de nouvelles théories de destruction de l'ozone par les SST à partir de 1971. Pourtant, racontera Halstead Harrison en 2003, il était pour sa part alors « pratiquement certain » que cette inquiétude au sujet de l'altération de la stratosphère par la vapeur d'eau des SST était « exagérée », que ce soit au moment de ses premières modélisations en 1966-67 ou en 1970-71, au plus fort de la controverse sur les SST. En 2003, Harrison se disait être convaincu que les SST n'avaient jamais eu *effectivement* d'impact significatif sur la composition de l'ozone ; c'était également alors l'avis des experts internationaux sur l'ozone, même s'ils précisaient

que les impacts des SST ne seraient sans doute pas insignifiants si une flotte importante était développée (en 2014, le discours dominant demeure le même).

Mais, en fait, se vantait alors Harrison, il avait été convaincu dès le début que l'inquiétude environnementale au sujet du développement de flottes de SST était « exagérée » (Harrison : "I was, and am, pretty sure that this concern was exaggerated"). L'autobiographie de Harrison (Harrison, 2003), la teneur de son article de 1970 et sa posture de retrait par la suite, au sujet de la protection de la couche d'ozone et plus généralement de la protection environnementale, et ceci pendant toute sa carrière (à l'inverse des "proactifs" Johnston ou Rowland, qui avaient pourtant un profil scientifique proche du sien) semblent en tout cas indiquer que, dans ces dernières années de la décennie 1960, Harrison s'était intéressé à la destruction de l'ozone, certes avec l'idée qu'elle pouvait advenir, mais sans "zèle environnementaliste" (En revanche, en 2003, Harrison jugeait que l'on avait eu raison de « négoci[er] des traités globaux pour réduire les émissions de chlorofluorocarbones » pour lutter contre le trou de la couche d'ozone antarctique). [Harrison, 2003, pp. 12-14 & 27]

Revenons pour finir, sur l'utilisation de modèles numériques, qui fut controversée dès les premières simulations sur la destruction de la couche d'ozone. Harrison raconte qu'il mesurait tout à fait les limites de ses modélisations. C'est même avant tout pour cette raison, et non par simple « courtoisie envers [ses anciens] amis et collègues » de Boeing, qu'il refusa de témoigner à une audition du Sénat au début de l'année 1971, « un événement clairement mis sur pied pour dénigrer Boeing ('for Boeing bashing') », alors que le projet SST était déjà très décrié. Il affirme qu'il avait, non seulement émis « de grandes réserves au sujet de son modèle et de ses calculs », mais également « de ceux de Ha[rold Johnston (en 1971), d'autant plus que] de très grandes incertitudes infectaient de manière inquiétante les modélisations chimiques de la stratosphère plus généralement ». Beaucoup de phénomènes physiques, notamment, étaient laissés de côté, faute de paramétrisations ou de capacité informatique à coupler le modèle de chimie à un modèle de dynamique de complexité satisfaisante.[209] Et Harrison d'affirmer, héroïque, que, « alors que pour des raisons sociales et économiques, il pens[ait] que les SST devaient être abandonnés, [il] ne pouvait [le] dire avec confiance pour des "raisons liées à l'ozone", devant le Congrès, comme "expert" ('I could not confidently say so for "ozone reasons", before Congress, as "an expert"') ». Toujours dans son article autobiographique de 2003, il poursuivait : « Le saut depuis nos modèles trop simples à des

[209] Harrison écrit :

> "Specifically, our models then assumed a photochemical steady state with a stationary sun over midlatitudes, and all transport in the vertical, only, parameterized through eddy-diffusivity coefficients. But the chemistry and sun are not stationary, and the dominating currents in the stratosphere are advective, not diffusive, and horizontal, not vertical." [Harrison, 2003, p. 27]

décisions nationales me semblait alors, et me semble toujours aujourd'hui, relever plus de l'hybris ('hubristic') que de la sagesse ». Avant de conclure dans son style caractéristique : « Cela dit, avec la perspective des trente ans écoulés, ces premières suppositions étaient remarquablement visionnaires. […] Bien que nous avions été, j'estime, plus chanceux qu'habiles. » [Harrison, 2003, p. 27]

Dernière chose. On pourrait penser que c'est parce que les modèles numériques stratosphériques des années ~1960-75 étaient rudimentaires – ils étaient à une dimension unique et couplaient rarement chimie et dynamique physique –, qu'ils étaient alors controversés. Toutefois, même après l'élaboration de premiers modèles dits de « chimie-transport » stratosphérique couplant « chimie » et « dynamique », le tout en deux dimensions 2-D, au milieu des années 1970, puis de modèles 3-D dans les années 1980, les modélisations numériques demeurèrent au cœur des critiques. Les modélisations numériques ont demeuré au centre de la plupart des controverses scientifiques au sujet de la destruction anthropique de l'ozone (voir Sous-chapitre 4.2 pour les années 1970, et le Sous-chapitre 7.2 pour les décennies 1980-90). (En outre, des controverses semblables existent aujourd'hui au sujet de très complexes simulations numériques du changement climatique, calculées par des ordinateurs très puissants.)

L'anticipation de la critique environnementale et le "secret scientifique" chez Boeing

Si H. Harrison met en doute la pertinence du résultat de sa simulation numérique, il ne parvient pas en revanche à réfuter son raisonnement théorique. Il se demande alors : « Que faire » d'un tel résultat, qui va de toute évidence contre les intérêts de Boeing ? Le chimiste rencontre l'ingénieur en chef chargé de la production des avions stratosphériques, Richard Swihart, avec lequel il convient que publier la chose dans un journal scientifique comporterait des dangers. « A la fin de l'entretien », c'est H. Harrison lui-même, prétend l'intéressé, « qui sugg[éra] que [sa] note de service pourrait être utilisée à mauvais escient dans les controverses politiques qui émergeaient alors autour des SST, et qu'il vaudrait donc mieux qu'elle eût une diffusion réduite. Swihart acquies[ça], bien sûr, et [ils] écriv[irent] rapidement une douzaine de noms, auxquels [ils] p[ourraient] l'envoyer sous cachet "confidentiel" », poursuit Harrison. Ce n'est que « trois ans plus tard environ » (mais plus vraisemblablement deux ans plus tard environ, en 1969), que « Jack Noyes, récemment promu à la tête du BSRL, re[cevra] une demande de Swihart pour former une équipe au sein du laboratoire, qui passer[ait] en revue les conséquences plausibles des flottes de SST sur l'atmosphère de la Terre. Bien, conclut Harrison, j'avais chatouillé le 'Leviathon' (*sic*), et ça le démangeait. »

Dès lors, « l'activité de conseil proactive ('proactive consulting') » sera le mot d'ordre au BSRL. « Puisque personne d'autre dans l'entreprise n'a vraiment abordé des problèmes [scientifiques] de ce type », Harrison est « chargé de monter une équipe critique ('a review team') ». Et, parce qu'il en « a le profil » et non Harrison, Jim Kenney est nommé chef de l'équipe. C'est visiblement au cours de cette période de constitution d'une nouvelle équipe, en 1969, que se produit une "fuite", soit de la note de service de Harrison qui avait été distillée avec force prudence deux ou trois ans auparavant, soit d'une note récemment rédigée par Harrison et collègues sur les impacts des avions stratosphériques sur l'ozone, dont Harrison fait également mention. L'une des deux notes a atterri sur la table d'un Parlementaire démocrate, Henry Reuss. Dans son article autobiographique, Harrison dément être l'instigateur de la "fuite". Peu nous importe ici.

Toujours d'après Harrison, Reuss annonce immédiatement la tenue d'une conférence de presse pour le lundi suivant, après avoir « informé la presse de l'existence d'un « document secret » sciemment dissimulé par la firme Boeing, [et plus précisément] par l'un de ses « scientifiques de renom » ('a top Boeing scientist') ». Comprendre : Halstead Harrison. « Ce document prédisait une perte globale d'ozone due aux SST », aurait déclaré Reuss [Harrison, 2003, pp. 14-16]. La tragédie est en marche.

Suit l'audition d'un Harrison déférent devant les haut placés de Boeing, et la décision de rédiger un article référencé, dans le but de couper court aux soupçons d'opacité de la firme. Il s'incarnera dans un article publié dans *Science*, signé par le seul « Halstead Harrison, du 'Boeing Scientific Research Laboratories, Seattle, Washington' ». Il concluait :

> *« Avec la [vapeur d']eau ajoutée par les conduits d'échappement des flottes d'avions supersoniques prévues [*(i.e. *500 aux Etats-Unis et 350 dans les autres pays du monde)], la colonne d'ozone pourrait diminuer de 3,8 pourcent, la puissance solaire transmise pourrait augmenter de 0,07 pourcent, et la température en surface pourrait grimper de 0,04 degrés K[elvin] dans l'Hémisphère nord. »* [Harrison, 1970, p. 734]

Les conclusions de Harrison n'évoquaient pas le risque de mutations des cellules vivantes, ni d'autres bouleversements environnementaux potentiellement induits par l'augmentation des flux d'UV. Elles mettaient uniquement en avant des impacts climatiques et météorologiques de cette augmentation, comme le faisaient les autres études de l'époque sur les impacts des vols SST. Ainsi, le risque que pointaient du doigt Harrison et « plusieurs auteurs » auxquels il se référait concernait la perturbation du « temps dans la stratosphère et en surface », voire de la balance radiative de l'atmosphère globale ; en définitive, des phénomènes météorologiques et climatiques anormaux pouvaient donc découler, soit directement de l'effet de serre de la vapeur d'eau émise par les avions SST, soit, comme chez Harrison, de la

destruction de la couche d'ozone induite par l'émission de vapeur d'eau (qui aurait une action physico-chimique globalement destructrice sur l'ozone), destruction qui produirait en retour une augmentation des flux radiatifs ultraviolets vers la basse stratosphère et la troposphère. [Harrison, 1970 ; Conway, 2008, p. 127]

Comme nous le développerons dans les Sous-sections suivantes, ce risque environnemental de destruction d'ozone par les SST sera ensuite brandi par d'autres chercheurs, en particulier par l'ancien professeur de H. Harrison à Stanford, Harold Johnston. Il donnera aux détracteurs du projet de flotte SST une nouvelle raison de le stopper. De nombreux employés de la firme Boeing ressentiront alors une amertume envers leurs élites dirigeantes et les chercheurs du BSRL. Comment expliquer, en effet, que Boeing n'eût pas contrôlé plus rigoureusement les études scientifiques menées dans ses laboratoires, et surtout leur diffusion vers l'extérieur ?

Dans les années 1960, le discours et les pratiques de recherche au sein de la firme Boeing se caractérisent d'abord par un travail au sein d'*équipes multidisciplinaires* (qui est facteur de plaisir, précise Harrison). En outre, Harrison exprime son sentiment de *liberté d'investigation*, dont il dit avoir pu pleinement jouir malgré le caractère majoritairement privé des financements du BSRL :[210]

> Harrison: « Notre gestion était bonne et créait des amitiés fortes et productives. C'était un bon endroit où travailler. [...] Curieusement et judicieusement ('Interestingly and wisely'), nous n'étions PAS chargés explicitement d'inventer des choses utiles, ni de soutenir de manière directe les programmes et projets de Boeing. A la place, on nous demandait de faire une recherche bonne et publiable (ce qui n'est pas toujours la même chose), et de nous tenir au courant de nos disciplines. »

On peut, certes, comprendre que les publications des chercheurs Boeing étaient autant de prestige qui rejaillissait sur la marque, et de liens créés avec la recherche universitaire. Mais, comme en témoigne la suite de la citation, la recherche fondamentale ne constituait que 80% du travail de Harrison, puisqu'il était tenu de consacrer, en droit, environ 20% de son temps de travail à des *activités de conseil* :

> « Notre tâche principale ('Our key task'), nous avait-on dit, était d'alerter Boeing sur les innovations scientifiques et techniques qui pourraient affecter les affaires de

[210] Cette possibilité de mener relativement librement des recherches fondamentales est évidemment liée à un afflux général de financements publics à l'ensemble de la recherche scientifique aux Etats-Unis pendant les années 1950-60, dont bénéficient la recherche publique mais aussi, par exemple, Boeing, par de multiples biais dont le financement public du programme SST.

> l'entreprise. On nous demanda de consacrer environ 20% de notre temps au conseil en interne ('in-house consulting'). » [Harrison, 2003, p. 7]

Certes, l'astreinte au travail de 'consulting' auquel Boeing soumettait ses chercheurs du BSRL était maigre en proportion, mais la direction de l'entreprise comptait bel et bien sur ses scientifiques pour être renseignée sur les activités de ses concurrents et de ses détracteurs. Il s'agissait même de leur « tâche la plus importante ('key task') », celle qui justifiait sans doute en premier lieu leur financement. Aux yeux de leur direction, le travail d'*anticipation* était selon toute vraisemblance plus important que la gloire académique. Selon des stratégies éprouvées dans de nombreux "champs", ce travail d'anticipation consistait *à atténuer, ou à englober, ou à "récupérer",* etc. *la critique*, avant qu'elle ne devienne un obstacle de poids, *ainsi qu'à conserver sa supériorité sur ses concurrents*.[211] L'activité de H. Harrison avait donc deux atouts potentiels pour Boeing : anticipation de la concurrence, d'une part, en informant sur les efforts technologiques des industries concurrentes ; anticipation de la critique "de type réglementaire", d'autre part, notamment le risque de critique environnementaliste qui poignait [Harrison, 2003, p. 7].

Ajoutons que, à la fin des années 1970 – « entre 1966 et 1970 », rapporte Ann Druffel, la biographe du météorologiste James McDonald, d'après un témoignage de son épouse –, « du fait de l'inquiétude grandissante du grand public états-unien au sujet de la pollution atmosphérique », Boeing fit appel à cet éminent spécialiste de la formation nuageuse pour savoir si les SST pouvaient créer des traînées de condensation, qui laisseraient des stigmates durables dans le ciel et/ou auraient des impacts significatifs sur la diffusion des rayons du soleil *i.e.* des impacts climatiques. A Seattle, James McDonald rencontra les officiels de la firme ; et, bien qu'il penchât déjà plutôt en défaveur du projet SST à l'époque, il leur déclara que, d'après lui, à ce stade de ses recherches, les SST ne pourraient pas créer de « traînées de condensation permanentes », ni quelque autre phénomène atmosphérique rédhibitoire au

---

[211] « Champ » peut ici être compris dans son acception bourdieusienne. Rappelons que, parmi les axes majeurs de définition du champ par Pierre Bourdieu, on trouve

- *l'inclusion/la réfraction* (Un champ est un microcosme, défini par sa (toujours relative) autonomie dans l'espace social global. L'autonomie du champ se mesure donc d'abord par sa capacité de « réfraction » des déterminations externes),
- et le trio de concepts d'*habitus* (un système de dispositions incorporées qui fait que l'on a plus ou moins intégré les règles implicites du champ et que l'on en joue plus ou moins « naturellement » le jeu), d'*illusio* (le signe le plus patent de « la complicité ontologique entre les structures mentales et les structures objectives de l'espace social ») et de *prises de position (inhérentes)*.

(Un dernier axe de définition du champ utiliserait les notions liées de *positions, lutte et capital spécifique* (Un champ se constitue ainsi sur la base d'une loi qui, du même coup, introduit un type de capital spécifique ; *etc.*).)

On pourrait ici sans difficulté expliquer le travail de recherche et de conseil des chercheurs de Boeing par leurs stratégies au sein du 'champ' de la recherche scientifique. Stratégies qui leur permettent, à la fois de participer à l'élaboration de nouveaux savoirs 'peer-reviewed' sur l'atmosphère (qui sont éventuellement porteurs de controverses pénalisant Boeing), et d'anticiper les attaques des contradicteurs de la communauté scientifique (voire de la société civile) et les nouvelles stratégies technologiques des concurrents.

développement d'une flotte d'avions supersoniques [Druffel, 2003, pp. 488-489]. En 1970, McDonald aurait changé d'avis, nous y reviendrons.

L'épilogue de la flotte stratosphérique Boeing est déjà connu : le relai de l'hypothèse de Harrison hors les murs de Boeing fut l'un des arguments utilisés dans l'arène politique en faveur de l'arrêt du programme SST, en 1970 et 1971. En finançant la "libre recherche" de Harrison, Boeing se serait *in fine* tiré une balle dans le pied… Mais est-ce vraiment certain ? Premièrement, comme le souligne Harrison : en présentant sa note interne de vingt pages à Swihart, il avait précisé (certes, en exagérant) « que la communauté scientifique entière se dirigeait à grand pas vers des conjectures similaires » aux siennes ("the global scientific community was rumbling about similar conjectures"). Harrison, en tout cas, est persuadé que l'alerte à la destruction de l'ozone par les SST, et la remise en question de celui-ci aurait de toute façon fini par se produire ("This would have happened anyway" [Harrison, 2003, p. 9])… Ceci nous amène à la remarque suivante : Harrison sous-entend que la faute revient à la direction de Boeing, qui n'a pas pris au sérieux son travail de veille de la contestation, qu'il avait bel et bien effectué, et avait cru naïvement qu'aucun autre chercheur ne parviendrait bientôt aux mêmes conclusions.

Deuxièmement, nous verrons dans le chapitre suivant que les causes de l'abandon du programme d'avions supersoniques furent plurielles, et que le risque pour l'ozone fut surtout un prétexte pour se débarrasser d'une technologie prodigue, si bien que la responsabilité de Harrison et de ses collègues est loin d'être la mère des raisons de l'abandon du projet états-unien d'aviation civile stratosphérique.[212]

---

[212] Il n'en demeure pas moins que, d'après Harrison, un ressentiment manifeste s'exprima au sein de Boeing en direction du BSRL, après la décision du Congrès de stopper définitivement son financement du programme de SST en 1971. En interne, l'idée que cette sentence fût liée à la "fuite" présumée de la note de Harrison dominait. On n'est jamais trahi que par les siens ! A en croire Harrison, le BSRL et lui-même en auraient fait les frais :

> Harrison: In 1971, "the senate […] voted. The SST was dead, layoffs were rife, and I had little future with the Boeing Company. Nor was I alone: the divisions, themselves caught in cruel cuts, prevailed over headquarters, and the BSRL [, which "was nominally within the headquarters division",] was asked to pay for itself through external contracts with federal agencies. This would have happened anyway, I'm pretty sure, but the role I had played didn't help any. The divisions did not love those adolescent, pointy-headed, privileged, isolated, meddlesome, ivory-tower types over at BSRL, all of us insufficiently "hard nosed", and not living the "real world". The messengers were ripe for throwing down the well. […] Good times screeched to a shuddering halt, and those of us who could disperse, did so."

Au sein de Boeing, le scepticisme et la jalousie envers le BSRL dataient donc peut-être de plus longtemps, puisque les membres du laboratoire scientifique bénéficiaient de conditions de travail exceptionnelles, étaient souvent des chercheurs "de type universitaire dans le public", et étaient de plus physiquement séparés du reste du personnel de l'entreprise :

> "The laboratory then [in December 1966] held about a hundred senior scientists, with a median age near 35, and another hundred of supporting staff, in four groups: Flight Sciences, Plasma Physics, Mathematics, and Geo-Astrophysics. I was hired into Flight Sciences and later shifted to Geo-Astro. We were housed in a well designed building, separated a kilometer from other Boeing facilities. That was a mistake, I think: isolation brought resentments." [Harrison, 2003, pp. 9 & 26]

Précisons que la figure de "victime" qu'adopte Halstead Harrison ressemble souvent à une simple mise en scène faite, qui d'hyperboles, qui d'autodérision, afin de tenir son lecteur en haleine. A la suite de l'affaire Boeing, Harrison

Le douloureux apprentissage du métier d'expert, dans une agitation médiatique intense (1970-71)

En 1970, l'hypothèse de la destruction anthropique de l'ozone par l'homme avait donc pénétré l'arène médiatique états-unienne, à la suite d'une fuite des conclusions de H. Harrison, nonobstant la vigilance de son employeur Boeing. La firme aéronautique devenait une proie idéale, dans un contexte de dénonciation des opacités de l'armée américaine au Vietnam,[213] de mécontentement au sujet des smogs, de préparation à

---

a cultivé divers mythes autour de ses prétendus échecs et persécutions, de manière (plus ou moins) hilarante (voir Harrison, 2008, en ligne sur le site de l'Université de Washington (Seattle)). L'épilogue de son article autobiographique de 2003 qui suit est donc à lire à l'aune de cet avertissement :

> "About a week after The Vote, I got a call from Walter Swan, a fairly senior engineer in one of the divisions, asking me to come over to brief him about Hal Johnston's bombshell headline, then fresh and infuriating while bodies were falling around our ears. [… Then, I came across] a letter-to-the-editor published in "Aviation Weekly and Space Technology", written by Swihart and listing by name Harold Johnston, Conway Leovy, Julius London, James McDonald, and me as having knowingly and maliciously withheld information that the SST would not harm the stratosphere. The letter included the figure that I had given Arnold Goldberg, and, after an intervening paragraph, concluded with "such behavior, which is even traitorous…". I spent a long shower over that one, wondering about my responsibilities, duties, and best course. I calmed down after awhile, concluding that a libel suit would be difficult, expensive, and problematic, that I was certainly about to leave the company anyway, one way or another, and that, bottom line, I really didn't feel all that damaged. From time to time I've since wondered whether I could have won a libel suit, and for how much. So, finally, I asked Jim Kenney to lay me off. There were some financial advantages in that, over quitting outright. He laughed and said "Hey, Ted! Whom are you kidding?" So, really finally, I quit and took a 60% salary cut into a soft-money position at the University of Washington, sharing some management and research tasks for Paul Hodge and Bob Charlson. Paul is a distinguished professor in the Astronomy Department. Bob, whom I've mentioned before, was then a Professor in the Civil Engineering Department. Later I was able to shift my appointment to an academic track, and I have lived happily ever after." [Harrison, 2003, p. 28]

De fait, son départ de Boeing ne rima pas avec une carrière moribonde, puisque Harrison fut accueilli au sein de la communauté universitaire des scientifiques de l'atmosphère (tout au plus perdit-il quelques dollars de salaire lors de son passage dans la recherche publique). L'opportunité sera donnée à Harrison d'accomplir une carrière universitaire éclectique comme chimiste de l'atmosphère ; il s'établira durablement à l'Université de Washington (Seattle), mais sera également sous contrat provisoire dans diverses autres institutions. Il publiera dans les meilleurs journaux spécialisés, principalement aux Etats-Unis (*Proceedings of the American Meteorological Society, Reviews of Geophysics and Space Physics, J. Geophysical Research, Science, J. Climate and Applied Meteorology, EOS, Atmospheric Environment, Proc. Air & Waste Management Association*), et occupera le poste de rédacteur en chef de l'important '(Journal of the) Atmospheric Environment' (comme 'Executive Editor' (1982-84) puis comme 'Associate Editor' (1984-92)). Certes, sa carrière ne fut pas prestigieuse mais éclectique (or, ces dires semblent indiquer sans ambigüité qu'il la souhaitait ainsi). Harrison cessa de publier sur la stratosphère, après un dernier article sur « l'oxydation du SO_2 dans la stratosphère » en 1974 (Harrison & Larson, 1974, *J. Geophysical Research*), pour se concentrer ensuite exclusivement sur la chimie troposphérique (smog photochimique (O_3, SO_2) et qualité de l'air, pluies acides). Il publia par exemple un article intitulé "The global sulfur box model", dans *Atmospheric Environment* (1979, Vol. 13, Issue 11, pp. 1351–1359), avec trois collègues des 'Departments of Atmospheric Sciences and Civil Engineering' de l'Université de l'Etat de Washington (Seattle) – Tsan-Ying S. Yuen, Robert J. Charlson et M.B. Baker. Et, il collabora à de nombreux rapports d'expertise (qu'il nomme génériquement « Professional Consulting »), dans les années 1990, pour des institutions publiques, principalement : des institutions régionales du Nord-ouest états-unien (Washington State Department of Ecology (1985), Energy Products of Idaho (1985), Oregon State Department of Air Quality (1986), Washington State Department of Ecology (1992 & 1997), Southwest Air Pollution Control Authority (1996)) ou pour des institutions fédérales (US National Park Service (1991-92) US Environmental Protection Agency (1993 & 1998), US Forest Service (1990-1996), U.S. Department of Agriculture, Forest Service (1995-2002)). [Harrison, 2008]

[213] En mars 1971, soit deux mois avant le vote du Congrès qui mettrait fin au programme de SST, la nouvelle discorde contre l'armée états-unienne au Vietnam était également venue de l'atmosphère, à la défaveur d'une "fuite" au sujet de ses activités d'ingénierie atmosphérique, comme le relatent Catherine Brahic et James Fleming :

> "During the Vietnam war, the US experimented with cloud seeding to create mud that would bog the enemy down. During this so-called "OPERATION POPEYE", the air force flew more than 2,600 cloud seeding sorties over the Ho Chi Minh trail. This led 70 nations, including the US, to ratify a UN treaty named

l'UNCHE et de création de 'New Social Movements' préoccupés par l'environnement global et/ou soutenant la mobilisation mondiale contre les atteintes à l'environnement (par exemple, 'Friends of the Earth', fondé aux Etats-Unis en 1969, puis qui devient 'Friends of the Earth International' en 1971, par association avec des organisations française, suédoise et anglaise), *etc*. Outre le reproche d'*opacité* fait à Boeing, le fait que la technologie incriminée, la flotte d'avions supersoniques civils, était jugé *non impérieusement nécessaire* (en particulier, elle n'était pas belligérante), ainsi que *potentiellement massive* (son expansion avait été *prise en compte dans les modélisations atmosphériques*, dès le début)[214], favorisa la mobilisation rapide des élus et de la société civile.

Mais, en fait, la décision du Congrès intervint tellement rapidement après la formulation d'une hypothèse de destruction de la couche d'ozone par les SST que la société civile eut à peine le temps de faire entendre sa voix sur ce point. Ses protestations portèrent plutôt sur les phénomènes locaux de nuisances sonores que sur le risque de destruction de la couche d'ozone. Ian Clark, qui a consacré un travail sociologique sur la controverse de 1970-71, estime toutefois qu'il est justifié de dire que « l'opinion publique a affecté les décisions des décideurs politiques ». Toutefois, une telle assertion ne nous dit pas qu'il y eut une mobilisation importante de la société civile. Il semble qu'elle fût maigre. Dans leur ouvrage *Protecting the Ozone layer*, Stephen Andersen et Madhava Sarma ne font mention d'aucune action de la société civile en 1970-71, alors que cette dernière sera très présente dans l'arène médiatique au sujet des CFC, en 1974-78, et surtout au cours des années 1985-92 [Andersen

"Convention on the Prohibition of Military or Any Other Hostile Use of Environmental Modification Techniques (ENMOD)" – opened for signature in 1977" [Brahic, 2009]. "In March 1971, nationally syndicated columnist Jack Anderson broke the story about Air Force rainmakers in Southeast Asia in The Washington Post, a story confirmed several months later with the leaking of the Pentagon Papers and splashed on the front page of The New York Times in 1972 by Seymour Hersh. By 1973, despite stonewalling by Nixon administration officials, the U.S. Senate had adopted a resolution calling for an international treaty "prohibiting the use of any environmental or geophysical modification activity as a weapon of war." […] At a time when the United States was already weakened by the Watergate crisis, the Soviet Union caused considerable embarrassment to the Ford administration by bringing the issue of weather modification as a weapon of war to the attention of the United Nations. The UN Convention on the Prohibition of Military or Any Other Hostile Use of Environmental Modification Techniques (ENMOD) was eventually ratified by nearly 70 nations, including the United States." [Fleming, 2007(a), pp. 55-56]

[214] Nous soulignons « *pris en compte dans des modélisations atmosphériques* » car, bien sûr, la plupart des activités industrielles sont lancées puis font l'objet de croissances très importantes, sans pour autant qu'une modélisation environnementale n'en montre dans un premier temps les impacts. L'exemple des CFC, décrit plus loin, donne une démonstration éclatante des monstres environnementaux que peuvent créer des secteurs industriels qui déclinent des polluants semblables (ici, contenant des CFC) dans une multitude de produits, sur plusieurs décennies et sur un marché immense. On pourrait toutefois objecter que c'est précisément parce que les CFC avaient été émis en grande quantité dans l'atmosphère, et parce qu'ils étaient semblables (car produits industriellement) et donc tous identifiables par le même instrument, que Lovelock avait pu les identifier au tournant des années 1970… Mais, en fait, le développement industriel tel que nous le connaissons depuis le XIX^{ème} siècle favorise deux tendances. D'une part, donc, la multiplication de substances semblables sur un plan physico-chimique (avec des effets synergiques possibles autour d'une de ces substances, dans différents secteurs de production). D'autre part, des innovations technologiques très fréquentes, qui créent un besoin croissant de garde-fous correspondant à des risques de plus en plus nombreux (la thématique des "nouveaux polluants atmosphériques traces" est ainsi devenue une composante importante de la surveillance des atmosphères urbaines, aux côtés des polluants plus classiques tels que le NO_2, les PM, l'O_3, surveillés dans la plupart des pays de l'OECE/OCDE depuis les années 1950, 1960 ou 1970).

& Sarma, 2002, Chapitres 8-9 & pp. 373-374]. Par contre, Clark propose une hypothèse intéressante (mais il ne pousse hélas pas la démonstration plus loin). Selon lui, « les "problèmes scientifiques" des dégâts par 'booms' soniques et autres catastrophes environnementales possibles semblent avoir influencé avec force l'opinion publique contre les SST » *parce que* « les hypothèses extrêmes [formulées par] des personnes qui n'étaient pas des experts furent rendues crédibles par l'attitude de certains experts, qui déclarèrent : "ce n'est pas exclu du domaine des possibilités" ('Extreme assertions by persons who were not experts were rendered credible by the "it is not outside the realm of possibility" advice of the experts') » [Clark, 1974, p. 424-425].

… Ainsi, un principe de précaution aurait joué un rôle déterminant ? Non. Car, en fait, comme le montre I. Clark, « pour la plupart des figures politiques, le lien causal entre le conseil qu'ils avaient reçu des experts [scientifiques] et les décisions politiques qu'ils avaient prises était plutôt indirect » [Clark, 1974, p. 425]. Aux yeux des membres du Congrès voulant stopper le programme de SST, l'argument environnemental avait vraisemblablement avant tout la vertu d'être "politiquement correct", et même de les faire apparaître comme une élite soucieuse de protéger le bon peuple…[215] alors qu'il ne fait guère de doute que la principale raison du vote du Congrès d'abandonner le projet fût *économique* (et donc, que la décision fédérale de financement de 1963 avait été mauvaise !). A la fin des années 1960, on commençait en effet à douter de la rentabilité du projet à moyen et long terme. D'autant plus que Boeing et ses partenaires réclamaient une rallonge financière substantielle à l'Etat fédéral. Nous y reviendrons.

Il n'en demeure pas moins que, pour que le risque de destruction de la couche d'ozone pût être brandi par des membres du Congrès, il fallut qu'une expertise scientifique vît le jour. Le travail de Halstead Harrison ne suffisait pas. Bien qu'il eût fait un réel effort de "référencement" pour rédiger son article de deux pages pour *Science* (1970), une expertise ne saurait se résumer aux travaux d'un unique individu. Moins encore aux travaux d'un "aéronome de circonstance", de surcroît travaillant chez Boeing. D'autres chercheurs vont alors apporter leur caution scientifique à l'hypothèse de Harrison, en vue des deux votes du Congrès, en 1970 et en 1971 : de manière décisive, l'ancien professeur d'université de

[215] Le risque pour les élites politiques était qu'on leur reprochât d'avoir "imposé" une nouvelle technologie dangereuse pour les simples citoyens, dans la mesure où ils avaient soutenus financièrement le développement des SST et que ces avions bénéficieraient principalement aux plus riches. Harrison introduit quant à lui une dichotomie, tout aussi discutable, entre « risques acceptés » et « risques imposés » :

> "It is possible to argue that our global society might accept 10,000 premature deaths a year in exchange for a social good. One may note that this rate is much less than the 40,000 US deaths per year from car accidents, and 400,000 deaths from tobacco [about 5 million, globally]. But there is a difference, it seems to me, between risks accepted and risks imposed. Risks from ski accidents, for example, are accepted by people who enjoy the sport; risks from cars by those who travel to work; risks from tobacco by… well, never mind. In the case of SSTs and the stratospheric ozone, however, cancers and early deaths would be imposed by a few people on many others excluded from any social good." [Harrison, 2003, p. 23]

Harrison, le chimiste Harold Johnston, dont le brouillon de son article à paraître dans *Science* fuitera, à son tour, dans les médias ; et, de manière plus malheureuse, le physicien-météorologue et ufologue James McDonald, qui sera auditionné et moqué par des membres du Congrès le 2 mars 1971. Chez Harrison, l'urgence n'était pas de mise, et la perturbation de la stratosphère méritait selon lui d'être étudiée uniquement pour ses répercutions climatiques (les émissions de vapeur d'eau de la flotte prévue induiraient selon lui une diminution de la colonne d'ozone 3,8%, et donc une augmentation de la température de l'air en surface de 0,04°K, dans l'Hémisphère nord) – telles sont en tout cas les conclusions de Harrison compilées dans son article de 1970 intitulé "Stratospheric Ozone with Added Water Vapor: Influence of High-Altitude Aircraft" [Harrison, 1970]. En revanche, James McDonald et Harold Johnston (qui citeront tous deux les travaux de Harrison) entendront quant à eux lancer une alerte, car ils verront dans la destruction anthropique d'ozone stratosphérique un phénomène catastrophique, à la fois du fait de ses conséquences climatiques ou météorologiques, mais également et surtout de ses conséquences sanitaires.

Haro sur "l'ufologue" James McDonald, porteur d'une alerte sanitaire alarmiste

En vue du second vote du Congrès sur la poursuite du projet de SST, James McDonald est auditionné par un sous-comité du Congrès des Etats-Unis (le 'Subcommitte' de l''U.S. House of Representatives on Appropriations Committee'), le 2 mars 1971. Physicien de formation et météorologiste reconnu, McDonald est membre de la prestigieuse 'American Meteorological Society'. Au cours des derniers mois précédant son témoignage devant les élus du Congrès, il a approfondi ses recherches sur les potentiels impacts atmosphériques des SST – qu'il avait déjà en tête depuis quelques années. Il l'a fait notamment à la faveur d'une invitation de la NAS ; il a préparé pour son panel 'NAS POWACM ('Panel on Weather and Climate Modification')' un texte de 85 pages, dont une version datée du 1 août 1970 existe dans les archives. Elle nous donne la certitude que, dès août 1970, McDonald était parvenu à la conclusion que des flottes de SST pourraient avoir une action destructrice sur la couche d'ozone. [Druffel, 2003, pp. 496-497 & 489][216]

Comme Harrison, McDonald a la conviction que les émissions de *vapeur d'eau* d'une flotte SST importante pourraient détruire la couche d'ozone. Mais le météorologue n'envisage plus seulement des problèmes climatiques, mais une *catastrophe sanitaire*. Au cours de son allocution devant le Congrès, il se lance dans des estimations alarmistes sur le

[216] D'après Andersen et Sarma, la NAS aurait demandé dès 1966 à James McDonald de produire des estimations de l'impact climatique global que pourrait avoir une flotte importante de SST [Andersen & Sarma, 2002, p. 372]. Nous n'avons trouvé nulle part ailleurs cette information. Elle ne figure pas même dans la biographie de J. McDonald publiée par Ann Druffel [Druffel, 2003].

Pour un récit détaillé de l'audition de McDonald devant le Congrès, consignée dans un document de 29 pages, nous renvoyons à Druffel, 2003, pp. 496-504.

nombre de cancers de la peau surnuméraires susceptibles de survenir en cas de constitution d'une grande flotte SST. « Voici ma présente estimation, déclare-t-il : une flotte de SST, telle que celle projetée aujourd'hui pour 1980-1985, pourrait induire une augmentation de la transmission des radiations solaires ultraviolettes telle, qu'elle causerait quelque chose dans un ordre de grandeur de 5-10 000 cancers de la peau additionnels chaque année dans les seuls Etats-Unis ». [McDonald, 1971 **in** Andersen & Sarma, 2002, p. 7 & Druffel, 2003, pp. 496-504].

McDonald devient alors une cible de choix pour les élus favorables au projet SST. D'abord, parce qu'il insiste clairement sur la possibilité d'une atteinte directe et immédiate sur les individus eux-mêmes, alerte qui est susceptible d'effrayer le plus grand nombre. Or, la plupart des auteurs ont jusqu'alors insisté sur le "*lointain*" risque climatique, voire simplement *évoqué* des risques sanitaires et environnementaux inhérents à l'exposition aux UV, documentés depuis plusieurs années voire décennies (cancers de la peau et autres maladies de la peau, cécité, impacts sur les organismes réalisant la photosynthèse, *etc.*). McDonald met les pieds dans le plat, en brandissant la menace d'une avalanche de cancer… alors même que fait rage aux Etats-Unis la controverse sur les effets délétères de la cigarette.[217] En novembre, alors qu'il participe encore au panel de la NAS, McDonald a déjà demandé que le 'Department of Transportation' (DoT), l'organe sur lequel les Représentants fédéraux comptent alors le plus pour les informer sur les perspectives du programme SST, informe immédiatement le Congrès sur les dangers de cancers de la peau que faisaient planer les SST (s'il venaient à détruire effectivement l'ozone). Le DoT lui avait opposé une fin de non-recevoir. [Druffel, 2003, p. 498]

L'autre talon d'Achille de J. McDonald provient de sa passion affichée pour son deuxième domaine d'étude : les OVNI. En 1970, il est encore membre de l'organisation à but non lucratif NICAP ('National Investigations Committee On Aerial Phenomena' ; l'institution est alors en crise, après quelques (rares) années de relative quiétude interne et de prospérité). Le but du NICAP est clairement de démontrer la présence d'OVNI. Au cours des années 1960, McDonald n'a eu de cesse de défier ses collègues scientifiques de l'atmosphère, ou encore l''Air Force Office of Scientific Research', au sujet de l'existence des OVNI, dont il est convaincu. Et, de promouvoir un programme de recherche poussé sur les OVNI auprès des plus hautes instances scientifiques. Il a par exemple prononcé un discours détaillé sur les OVNI devant ses pairs de l'Assemblée de l''American Meteorological Society', à Washington, le 5 octobre 1966.

[217] La cigarette était suspectée depuis les années 1950 de provoquer des cancers du poumon. Aux Etats-Unis, en 1970, les publicités sur les cigarettes furent interdites à la télévision, et les contre-publicités réglementées ; l'activisme de masse pour les droits des non-fumeurs émergea également autour de 1970.

Son aspiration à faire des OVNI un objet d'étude respectable est fortement désavouée dans l'arène scientifique. Mais, dans le Capitole des Etats-Unis, à présent, ses études sur les OVNI fournissent aux défenseurs du projet SST une occasion de décrédibiliser l'expertise de McDonald, en mettant en doute sa légitimité à se présenter comme un scientifique. Un membre républicain de la Chambre des Représentants, Silvio Conte (Massachussetts), concentre ainsi ses attaques sur la personnalité et les "croyances extra-scientifiques" de "l'ufologue McDonald", au cours de son plaidoyer en faveur du projet SST, provoquant l'hilarité d'une partie de l'hémicycle.[218] Quelques jours auparavant, le 18 mars 1971, rapportera H. Johnston, McDonald avait déjà subi une attaque semblable de la part d'un membre de Boeing, Arnold Goldburg, lors d'une conférence scientifique organisée par Hirschfelder.[219] [Druffel, 2003, pp. 484-515 ; Johnston, 1992, p. 16]… "L'ironie de l'histoire", si nous pouvons formuler la chose de la sorte, tient dans le fait que c'est précisément principalement l'intérêt qu'il portait aux OVNI qui avait conduit McDonald à devenir un spécialiste – visiblement peu contesté dans les hautes sphères scientifiques – de la condensation nuageuse et des traînées d'appareils volants.

La fuite du brouillon du chimiste de Berkeley Harold Johnston

C'est au cours de cette même conférence du 18 mars 1971 que Harold Johnston serait parvenu à une formulation convenable de son hypothèse sur la destruction de l'ozone par les NO_x des SST [Johnston, 1992, p. 16-19].

Au tournant des années 1970, des travaux de laboratoire et de terrain existent certes au sujet des interactions chimiques entre ozone et vapeur d'eau, et, dans une moindre mesure, entre ozone et composés azotés. Par contre, aucune étude empirique *in situ* dans la stratosphère n'a été réalisée spécifiquement au sujet des émissions SST. De plus, toute étude empirique statistiquement pertinente semble impossible, du fait du faible trafic SST. Par conséquent, les hypothèses de destruction de l'ozone par les SST se construisent sur un plan *théorique, de manière déductive* (faute de mesures aptes à établir des corrélations empiriques

[218] Le lecteur souhaitant des détails sur le travail de James McDonald sur les OVNI et ses déboires devant le Congrès en 1971 pourra se reporter à la "biographie autorisée" de McDonald : Druffel, 2003. Druffel n'exclut pas que les humiliations subies aux Congrès contribuèrent à conduire J. McDonald à se donner la mort le 13 juin 1971, au terme d'une longue dépression. [Druffel, 2003 ; voir aussi http://www.anndruffel.com/articles/ufo/jamesmcdonaldsufofiles.htm (22/09/2014)]

[219] Harold Johnston raconta cette mésaventure de McDonald, survenue six jours après l'allocution de ce dernier devant le Congrès :

> "In the afternoon [of March 18, 1971], McDonald presented […] the epidemiology of skin cancer as a function of latitude. In any homogeneous population, the fraction of persons who get skin cancer increases from north to south in the Northern Hemisphere and from south to north in the Southern Hemisphere. Annual average overhead ozone changes in the opposite sense. McDonald related skin cancer to overhead ozone via latitudinal epidemiology and then predicted how much additional skin cancer would be caused by long-term 1% ozone reduction by SSTs. Although McDonald presented his material in a scholarly, dignified manner, Arnold Goldburg, the Boeing Company representative, heckled him relentlessly and scornfully throughout his talk." [Johnston, 1992, p. 16]

entre émissions des SST (puis, par la suite, des navettes spatiales et des CFC) et concentrations d'ozone). Après Halstead Harrison, c'est Harold Johnston, son ancien professeur à Stanford (que Harrison surnomme « Hal », dans son article autobiographique de 2003), qui produit un travail théorique décisif qui corrèle émissions des avions supersoniques et destruction de l'ozone stratosphérique. Il paraîtra finalement dans *Science* le 6 août 1971, sous le titre "Reduction of Stratospheric Ozone by Nitrogen Oxide. Catalysts from Supersonic Transport Exhaust". En lieu et place des émissions de vapeur d'eau, ce sont les émissions azotées (NO_x) des SST qui sont incriminées.

Toutefois, les résultats de Johnston, établis dès mars 1971 lors de la conférence organisée par Hirschfelder, ont été diffusés avant la parution de l'article dans *Science* en août 1971. Et, plus problématique, avant le second vote, dirimant, du Congrès, le 19 mai 1971, qui met définitivement fin au programme SST états-unien. Le brouillon de l'article de Johnston pour *Science* a même fuité la veille du vote du Sénat, faisant grand bruit. Le 17 mai 1971, soit l'avant-veille du vote, « le 'San Francisco Chronicle' [avait déjà] titré quelque chose comme "SSTs TO REDUCE OZONE BY 50%, SAYS UC [University of California] PROF" », se remémorera Halstead Harrison [Harrison, 2003, p. 21]. Reconnaître, dans ce « professeur de l'Université de Californie » : Harold Johnston, dont les hypothèses sont donc sorties de l'arène scientifique pour pénétrer, avec fracas, l'arène médiatique.[220]

Johnston avait commencé à s'intéresser à la question de la destruction de l'ozone stratosphérique moins d'un an auparavant, alors qu'il assistait à une conférence sur les conséquences des SST présidée par William Kellogg, alors président de l''American Meteorological Society'. Ce dernier y avait présenté les résultats qui venaient d'être publiés au sein du grand rapport estampillé MIT, le *Man's Impact on the Global Environment, Report of the Study of Critical Environmental Problems*, dit « SCEP », publié à l'été 1970. Dans ce document, l'équipe « climat », réunie autour de Kellogg avait abordé – très rapidement – la question des impacts environnementaux des SST. Dans son article de 1971, Johnston en cite une recension de Carter, qu'il a lue dans *Science* :

[220] Bien qu'ils se soient rencontrés au début des années 1960 (Harrison est alors encore étudiant), rien n'indique que Johnston et Harrison aient échangé sur l'hypothèse de destruction de l'ozone jusqu'en 1971. Il n'existe pas de lien épistémologique entre les travaux scientifiques que menèrent ensemble Harrison et Johnston sur la chimie de laboratoire et la chimie troposphérique, entre 1960 et 1962, et les travaux que menèrent les deux hommes au sujet de la destruction de l'ozone stratosphérique par les SST, en 1970-71. En outre, au cours de la période décisive 1967-1971 d'élaboration d'hypothèses scientifiques sur la destruction de l'ozone par les SST, Harrison et Johnston lurent peut-être leurs travaux respectifs lorsque publiés, voire les fuites de leurs brouillons tels que relayés dans la presse, mais ni Harrison, ni Johnston, ni aucun des analystes de la controverse que nous avons lus n'évoquent un échange épistolaire ou une rencontre entre les deux hommes pendant cette période. [Harrison, 2003 ; Johnston, 1992 ; Clark, 1974 ; Dotto & Schiff, 1978; Andersen & Sarma, 2002]

> « D'après *Science*, « le groupe a soulevé une possibilité apparemment jamais considérée jusqu'alors dans les débat sur les SST : la flotte SST, en se déchargeant de produits de combustion tels que de la suie, des hydrocarbonés, des oxydes d'azote, et des particules sulfatées, pourrait provoquer un smog stratosphérique. [...] Le monoxyde de carbone et l'azote dans ses formes variées peuvent également jouer un rôle dans la photochimie stratosphérique ; mais, en dépit d'incertitudes sur les vitesses de réaction du CO et des NO_x plus importantes qu'au sujet de la vapeur d'eau, ces contaminants seraient beaucoup moins significatifs que la vapeur d'eau ajoutée et pourraient être négligés ». » [Carter, 1970, *Science*, *n° 169* **in** Johnston, 1971, p. 517]

Or, Johnston est un spécialiste des smogs urbains. Immédiatement, il questionne la pertinence de cette dernière assertion avancée par le SCEP, sur la base des phénomènes qu'il a rencontrés dans sa pratique de la chimie *troposphérique*. En effet, les NO_x jouent un rôle prédominant dans la chimie de l'ozone troposphérique ; pourquoi ne serait-ce pas le cas dans la stratosphère ? (Nous développons ce point dans notre Sous-chapitre 4.2).

Johnston se lance alors avec un étudiant dans une étude théorique, qui va *in fine* prendre la forme d'une réfutation des conclusions de Kellogg et de ses collaborateurs exposées dans le rapport du MIT : dans la stratosphère, les NO_x issus des gaz d'échappement des avions stratosphériques constitueraient bien un agent chimique d'importance, et même plus destructeur d'ozone que la vapeur d'eau. De ce fait, les SST seraient, selon Johnston, potentiellement capables de perturber la couche d'ozone de manière plus significative que le SCEP ne l'a prévu (en imputant quant à lui le phénomène presque exclusivement à la vapeur d'eau). Dès la fin de l'année 1969, un rapport d'activité naît de la collaboration de Johnston et de son étudiant. Puis, Johnston peaufine son schème théorique lors des journées de travail organisées par Hirschfelder, les 18 et 19 mars 1971.

Mais, comme nous l'avons annoncé, le travail qui en est tiré, un brouillon destiné à *Science*, "filtre", "fuite" – comme la note de Harrison et ses collègues deux ans plus tôt ! Or, sur son brouillon, Johnston avait émis une hypothèse alarmiste : la destruction de l'ozone stratosphérique qu'il prévoyait pourrait induire une cécité partielle voire totale du monde animal. Cette hypothèse fut reprise par le *San Francisco Chronicle* et le *New York Times*, respectivement l'avant-veille et la vielle du dernier vote du Congrès sur les SST. Johnston la supprimera ensuite de son brouillon d'article, et ne l'exposera plus jamais dans ses communications. Mais, l'hypothèse était bel et bien connue des Sénateurs, lorsqu'ils votèrent la fin du financement du programme de SST états-unien, le 19 mai 1971.

En 1970, des coupes budgétaires sur le programme SST avaient déjà été consenties. La menace d'une suppression totale des financements pesait sur le projet. Toutefois, début mai 1971, quelques jours donc avant le vote du Sénat, les défenseurs du projet SST, qui comptaient parmi eux le Président Richard Nixon, avaient tenté de le relancer. Le vote de la Chambre des Représentants du 11 mai avait plaidé en sa faveur, à une courte majorité. C'est au Sénat qu'allait revenir la décision finale.[221]

Il régnait, depuis le début de l'année 1971, un climat de tension et de suspicion dans les arènes scientifique et experte nord-américaines, qu'a décrit l'historien Erik Conway : « Un membre du 'Transportation Department's stratospheric impact panel', Hirschfelder, en était venu à penser que le 'Transportation Department' cherchait à influencer son groupe de travail, en limitant son accès aux seules données de Boeing. Il demanda d'avoir accès aux autres sources de données, et le 'Transportation Department' finit par céder. Hirschfelder fut [également] autorisé à organiser une conférence [les 18-19 mars 1971]. Il invita un petit nombre de scientifiques universitaires, dont McDonald [et Johnston… Mais, ce dernier] devint rapidement agacé par le déroulement des évènements. En sus de l'atmosphère très tendue qui régnait, les conférences semblaient accepter les conclusions de l'étude du SCEP, selon lesquelles les oxydes d'azote ne seraient pas une cause significative de destruction de l'ozone. » [Conway, 2008, pp. 132-133]

Johnston s'était alors lancé activement dans l'écriture d'un article, qu'il adressa à *Science* le 14 avril 1971. Les relecteurs l'enjoignirent de faire référence aux publications de Crutzen sur les NO_x « d'origine naturelle » de la stratosphère, et d'utiliser un ton « moins passionné », rapporte Conway. Qui précise que cette version était pourtant moins alarmiste, moins « passionnée » que le brouillon précédent, qu'il avait envoyé à quelques collègues quelques semaines auparavant, et qui évoquait les impacts des UV sur la vue. Or, c'est ce premier brouillon qui avait percolé dans l'arène médiatique, notamment dans le *New York Times*, quelques heures avant le vote du Congrès. Ce brouillon liminaire, daté du 2 avril, « avait fuité dans le journal californien *the Newhall Signal* [où il avait été publié le 16 mai], raconte l'historien Erik Conway, ce qui avait incité le 'Public Relations Office' de l'Université de Californie [dont dépendait Johnston] à le publier [dans son intégralité.] Des résumés sensationnalistes du brouillon de Johnston transitèrent à toute vitesse à l'est par les services télégraphiques, et le 17 mai [(d'autres sources parlent du 18 mai)], soit deux jours [(ou un jour)] avant le vote du Sénat dans une tentative de relancer le programme SST, l'histoire fit *the New York Times* » [Conway, 2008, pp. 132-133, vraisemblablement d'après

[221] Les journaux américains avaient titré :
"May 11. *New York Times,* p. 22, "SST backers, with Nixon support, seek to revive project in House today";
"May 13. *San Francisco Chronicle*, p. 1, "201-197 vote, House revives the SST – fight goes to Senate" [*New York Times*, 1971 (May 11) & *San Francisco Chronicle*, 1971 (May 13) **in** Johnston, 1992, p. 21]

Johnston, 1992, pp. 15-23]. Johnston regrettera amèrement avoir communiqué son premier brouillon du 2 avril (ce qu'il avait fait « à Hirschfelder, London, Eliott, et trois professeurs de Berkeley », sans qu'il puisse savoir qui l'avait ébruité), qui contenait « cette assertion idiote […] sur l'effet des radiations ultraviolettes sur la cécité », écrirait-il en 1992 [Johnston, 1992, p. 20].[222]

Le Sénateur Clinton Anderson se chargea de faire la promotion de l'article. Dans les heures qui précédèrent le vote du Sénat du 19 mai 1971, deux objections voulues dirimantes furent en fait ébruitées par les opposants aux SST, principalement dans les colonnes du *New York Times*. D'une part, donc, ils utilisèrent les arguments les plus alarmistes au sujet de la destruction de l'ozone et ses impacts sanitaires. D'autre part, mirent-ils en garde, relancer le programme SST coûterait au moins un demi milliard de dollars en sus du budget alloué avant 1971 (Johnston rapporte que, d'après le *New York Times* du 17 mai 1970, paru donc deux jours avant le vote, cet argument économique, avancé par le Président de Boeing, William Allen, en personne, aurait fait passer des sénateurs favorables au projet SST dans l'autre camp).[223] Le 19 mai, le Sénat votera l'abandon du programme SST, à 58 votes contre 37.

---

[222] Ian Clark parle quant à lui, non d'une fuite du brouillon de l'article de Johnston destiné à *Science* et achevé le 2 avril 1971, mais d'une interview ou d'une colonne de Johnston dans le *New York Times* :

> "And Finally, in May 1971, the day before the final vote on the SST programme, a Berkeley chemist [Harold Johnson] suggested in *The New York Times* that depletion of ozone induced by nitric oxide could be much more serious than the previously considered depletion of ozone induced by water vapour, and that all animal life might be blinded as a result of the operation of the SST aircraft (Professor Harold Johnson, *The New York Times,* 30 May, 1971)." [Clark, 1974, p. 418]

Nos autres sources infirment cette version.

De plus, « la veille du vote final sur le programme SST », donc la veille du vote du Sénat, n'était pas le 30, mais le 18 mai 1971. La fuite du brouillon de Johnston s'était incarnée dès le 17 mai, dans la presse locale, raconte le chimiste. Un petit journal du sud de la Californie, le *Newhall Signal*, en avait fait « une recension spectaculaire, en particulier en ce qui concernait le risque « d'aveuglement » ». Dans la foulée, suggère Conway (le 17 ou le 18 mai), le *New York Times* avait relayé l'alerte. C'est sans doute à cet article du *New York Times*, nullement de la main de Johnston, que Clark souhaitait faire référence. [Conway, 2008, pp. 132-133]

De l'avis de Johnston lui-même, le rédacteur en chef du *New York Times* chargé des sciences, Walter Sullivan, donnera « le 30 mai [suivant] une exposition claire de son papier du 2 avril, en exposant clairement la nature des cycles catalytiques et comment une quantité relativement faible d'oxyde d'azote pouvait avoir un impact significatif sur l'ozone ». Il en avait toutefois conservé l'élément très polémique, que Johnston avait entre temps renié : le risque qu'une partie ou l'ensemble du monde animal ne se retrouvât aveugle…

Johnston relate ainsi les évènements :

> On April 2, 1971, "I completed the first draft of what I intended to be an article to *Science*. This article was an expanded version of my March 18 paper [oral presentation]. I had read about the effect of ultraviolet radiation on snowblindness, and I included a foolish statement about that in my draft article. A few days later, I removed the foolish statement about that in my draft article. […]
>
> "May 17. Someone had leaked my April 2 draft paper to a small southern California newspaper, the *New Signal*, which gave it a spectacular presentation, especially on "blindness". [Johnston, 1992, pp. 21-22]

[223] *New York Times*, mai 1971 :

> "May 14 […], pp. 1, 67, "Washington, May 13 – The board chairman of the Boeing Company, William M. Allen, said today that the revival of the supersonic transport program require at least half a billion dollars more in government financing than was needed before the project was cancelled."
>
> "May 18 […], p. 66, "Washington, May 17 – Senate backers of the supersonic transport acknowledge today that chances for revival of the SST were dwindling rapidly under the weight of its projected cost." [**in** Johnston, 1992, pp. 21-22]

Par ailleurs, *Science* publiera une version revue et corrigée de l'article de Johnston dans son numéro du 6 août 1971. Cet article deviendra plus tard une relique de l'histoire environnementale des sciences de l'atmosphère, souvent citée comme la première hypothèse "plausible" de destruction chimique anthropique de la couche d'ozone, et même comme première alerte aux effets environnementalement délétères des activités humaines sur les "équilibres naturels" d'une composante globale de l'atmosphère. (Même si, comme nous le rappellerons à plusieurs reprises, dans la communauté de l'ozone, le schème théorique de H. Johnston de 1971 a été largement remis en question dès les années 1970, ainsi que, dans les années 1970 et au-delà, la conclusion d'une destruction, plutôt qu'une augmentation, d'ozone comme corollaire d'un apport de NO_x par des avions supersoniques.)

Un débat durablement structuré en matière de réduction de l'impact sanitaire des UV

Lorsqu'il avait conclu à une possible destruction anthropique de l'ozone stratosphérique, Halstead Harrison ne s'était nullement inquiété des conséquences sanitaires qu'elle occasionnerait. Il avait par contre reconnu le potentiel réchauffement climatique subséquent, et les inhérentes "perturbations" de la dynamique atmosphérique. Il ne s'en était pas alarmé non plus. Par contre, Harold Johnston avait, dans un premier temps, pris très au sérieux (et même trop au sérieux !, selon lui, 'a posteriori') l'hypothèse d'augmentation des cancers de la peau agitée par James McDonald, et lui avait ajouté par ailleurs l'impact des UV sur la vue de l'homme et des animaux.

Dans son article paru dans *Science* au milieu de l'année 1971, Johnston n'évoquera toutefois aucun de ces deux impacts (cancers et cécité), préférant mettre l'accent sur le risque climatique, qui était plus consensuel au sein de la communauté scientifique ; et surtout, qui relevait de son domaine d'expertise, la science de l'atmosphère. Pourtant, les sciences des origines de la vie, qui avaient pris leur envol à la faveur de la planétologie comparée dans les années 1950-60, avaient largement insisté sur le rôle de la mince couche d'ozone comme une entité protectrice, conditionnant l'existence des grands organismes vivants terrestres. Par ailleurs, des laboratoires de médecine avaient montré les effets des rayons UV sur les cellules biologiques. Si McDonald fut violemment attaqué lorsqu'il chercha à faire du développement des SST une problématique de santé publique, c'est d'abord parce que son hypothèse touchait à la santé de chacun et à court terme, donc risquait de mobiliser beaucoup plus que des questions de changements climatiques et météorologiques. L'hypothèse théorique qu'une diminution de l'ozone induirait une augmentation des rayons UV-B, et donc des risques cutanés, n'était en aucun cas absurde scientifiquement. Au

tournant des années 1970, « des scientifiques du milieu médical étaient convaincus que les radiations ultraviolettes provoquaient certains types de cancer », rappelle l'historien Erik Conway. J. McDonald, pour sa part, cite trois ouvrages de références sur le sujet : F. Urbach, 1969, *The biologic effects of ultraviolet radiation* ; A. Hollaender (ed.), 1965, *Radiation biology* ; H.F. Blum, 1959, *Carcinogenesis by Ultraviolet Light*. [Conway, 2008, note n° 24 du Chapitre 5]

Soit. Il n'en demeure pas moins que le champ d'études épidémiologistes quantitatives sur les impacts épidémiologiques des UV était encore très embryonnaire à l'époque (en particulier, les recherches comparatives sur la situation dans différentes régions du monde étaient pratiquement inexistantes). Souligner la rareté des études pertinentes sur les impacts sanitaires des UV permettait de mettre en doute la démonstration scientifique de McDonald à moindre frais. De plus, la simplicité du calcul que le météorologiste avait présenté à la fin de son audition au Congrès pouvait facilement le faire passer pour un "amateur". Le chiffre de « 5 000 à 10 000 cas additionnels de cancers de la peau [à prévoir] chaque année, pour les seuls Etats-Unis » avait en effet été obtenu à l'aide d'un simple produit en croix : « chaque pourcent de réduction de la concentration d'ozone générerait une hausse de 6 pourcent des occurrences de cancers de la peau ». [Conway, 2008, pp. 130-131 & 345 ; Oreskes & Conway, 2010, p. 108]

En tout cas, beaucoup de collègues atmosphériciens vont se désolidariser des résultats de J. McDonald. Lorsque le responsable de l'équipe « climat » du rapport *Man's Impact…* du MIT (1970) et collègue de McDonald au NCAR de Colorado, Will Kellogg, témoigna devant le 'House Subcommittee in Transportation Appropriations', rapporte Ann Druffel, « il soutint dans un premier temps le témoignage de McDonald sur les effets que les SST pouvaient avoir sur l'ozone. Il prédit également que les flottes de SST pourraient créer un problème de smog dans la stratosphère et d'autres effets environnementaux indésirables. Toutefois, Kellogg jugea défectueuses ('flawed') les données de McDonald établissant un lien entre dégâts sur l'ozone et cancers de la peau » [Druffel, 2003, pp. 488-505 ; Druffel, 2003, p. 503, d'après Kellogg, 1971, 'Hearings before the House Subcommittee in Transportation Appropriations', March 2, 1971].

En fait, non seulement McDonald avait construit dans l'urgence une thèse épidémiologique dans une discipline – l'épidémiologie – qu'il n'avait jamais étudiée, mais il n'avait jamais publié non plus d'articles sur l'ozone stratosphérique (et moins encore, sur sa théorie de la destruction de l'ozone par les SST) dans des revues à comité de lecture.[224] Nous n'en avons, en tout cas, trouvé aucune trace. La partie de la biographie de McDonald

[224] McDonald ne put, non plus, publier sur l'ozone *après* son audition du 2 mars 1971 devant le Congrès, puisqu'il se donna la mort le 13 juin de la même année.

qu'Ann Druffel a consacrée à la controverse de l'ozone n'en fait pas non plus mention. Les communications de McDonald sur la destruction de l'ozone par les SST et ses conséquences sanitaires, entre novembre 1970 et mars 1971, semblent avoir été toutes réalisées oralement, lors de conférences scientifiques ou d'auditions pour le Congrès des Etats-Unis [Druffel, 2003, pp. 488-505]… On reste par conséquent perplexe, en constatant que les travaux de McDonald de 1970-71 soient régulièrement cités *dans la littérature des sciences de l'ozone*, comme l'une des pierres de touches des études sur la destruction de l'ozone et ses conséquences… Mais, par le biais d'une telle citation, ne rallonge-t-on pas artificiellement l'histoire du champ (ici, celle qui doit établir la preuve entre afflux d'UV et cancers de la peau), et par là même potentiellement la crédibilité de ses dignitaires ?

L'insistance de lanceurs d'alerte sur les impacts sanitaires des vols supersoniques eut par ailleurs un effet pervers. Alors que les pro-SST avaient dans un premier temps rejeté l'idée même d'une corrélation entre SST et cancers de la peau, ils trouvèrent rapidement un intérêt patent à cadrer le débat environnemental sur les SST en termes d'atteinte à la santé. En effet, constatèrent-ils, pour tout un éventail de raisons, il était plus facile d'attaquer les études épidémiologiques que les études des scientifiques de l'atmosphère. Les objections qui revinrent le plus souvent furent la rareté des études épidémiologiques, ou "au contraire" la diversité régionale des études de cas, qui les rendaient incomparables (les populations étaient hétérogènes, et donc les facteurs de cancer de la peau : multiples).

Les industries des CFC perpétueront la stratégie des pro-SST. Sûre d'elle, l'industrie DuPont, le plus grand producteur de CFC au monde et fabriquant la moitié des CFC des Etats-Unis, déclara même en 1974, comme une provocation, que « si des études montraient "que les chlorofluorocarbones ne pouvaient être utilisés sans menace pour la santé, DuPont arrêterait la production de ces composés" » [DuPont, 1974, 'United States Congress' **in** Litfin, chapter 3, p. 9]. Karen Liftin rapporte que, plus tard, dans les années 1980, « lorsque les preuves scientifiques [liant destruction d'ozone et cancer de la peau] s'accumulèrent, on rappela à DuPont sa promesse »… Le pli, en tout cas, avait été pris. Dans la lignée de ce qu'avait fait Boeing, dont un membre avait publiquement moqué l'épidémiologie de McDonald le 18 mars 1971, lors de la conférence scientifique organisée par Hirschfelder, DuPont lia « sa politique aux effets des CFC sur la santé humaine, [en contribuant à] cadrer la problématique de telle sorte que le débat se focalisât sur les effets de la destruction de l'ozone sur la santé, plutôt que sur les changements climatiques et, plus généralement, environnementaux. Bien que ce mode de cadrage fût vraisemblablement involontaire, conjecture Litfin, ses ramifications se firent pendant tout le processus de prise de décision. Dès le début [de l'affaire CFC en 1974, en tout cas], le problème fut presque entièrement

défini en termes de cancer de la peau » [Litfin, 1994, chapter 3, p. 9]. Et par la suite, il demeura le problème majeur. Plus généralement, les risques épidémiologiques (cancers de la peau, vieillissement de la peau, impacts sur la vue, voire les possibles mutations génétiques dues aux UV-B) sont restés *le* sujet central des controverses sur les SST puis les CFC dans les années 1970 et 1980, *aux dépens des autres effets biologiques* (effets des UV-B sur des micro-organismes, plantes et espèces animales, terrestres ou aquatiques), *ainsi que des questions climatiques et de l'équilibre atmosphérique global* (bien que ces questions soient plus présentes à partir des années 1990, dans une phase où le remplacement des CFC par les HCFC laisse entrevoir la sortie de crise de l'ozone, et où le changement climatique s'impose comme la thématique hégémonique des sciences de l'atmosphère ; voir Sous-Chapitre 8.2). [Andersen & Sarma, 2002, p. 47]

Il faut néanmoins modérer notre jugement. Certes, comme nous l'avons fait remarquer dans le Chapitre 1, la demande d'études épidémiologiques "complémentaires", "plus exhaustives" constitue l'une des manœuvres dilatoires les plus utilisées par les opposants aux réglementations des pollutions, depuis le XIX^{ème} siècle. Mais, traditionnellement, la plupart des politiques de pollutions de l'atmosphère, même les plus strictes, visent à réduire les effets néfastes de ces pollutions sur la santé publique. En outre, le climat d'alerte sur les cancers, particulièrement important au tournant des années 1970, puis durable, a sans nul doute fortement contribué à mettre au centre les questions de risques de cancers de la peau, et plus généralement de risques sanitaires… A moins qu'il ne faille y voir une tendance politique de fond, obnubilée par des problématiques environnementales affectant rapidement et directement les individus, au détriment des problématiques environnementales touchant le reste du vivant et/ou dont les enjeux sont avant tout intergénérationnels.

Les raisons multiples de la décision du Congrès de mettre fin au projet de SST

La controverse SST aux Etats-Unis ne se résuma nullement à la bravoure et à la force de persuasion de quelques acteurs scientifiques, convaincus avant l'heure de la nécessité de protéger la couche d'ozone des agressions humaines. Certes, nous ne sommes pas en capacité de décrire la complexité des débats multi-acteurs des années 1970-71. Par contre, à la lecture des conclusions livrées dans la littérature, il nous semble acquis que la décision radicale du Congrès d'abandonner le programme SST, qui fut prise en 1971, alors que très peu d'études existaient sur les impacts environnementaux des SST, répondit en premier lieu à un impératif économique.

Mais, revenons, pour commencer, sur la pertinence des expertises scientifiques sur la destruction de l'ozone en 1970-71. Elle mérite d'être questionnée. En effet, comme la

construction de la théorie de Molina-Rowland quelques années plus tard (1973-74), l'élaboration de l'hypothèse de destruction de l'ozone par les STS s'était faite en l'espace de trois ans tout au plus (de 1969 à 1971), dans l'urgence donc. Le politiste Ian Clark, qui a signé en 1974 un long article sur la controverse états-unienne des SST en 1970-71 ("Expert Advice in the Controversy about Supersonic Transport in the United States") alors qu'il était 'Executive Assistant to the Minister of State for Urban Affairs' du Canada, a rencontré au cours de son travail de recherche plusieurs auteurs, qui ont suspecté des scientifiques "devenus plus militants que scientifiques" (McDonald et Johnston en tête) d'avoir bâti une démonstration scientifique simpliste et peu référencée, dans la plus grande urgence et la plus grande confusion. Certains de ces auteurs pensent même que ces "scientifiques-militants" seraient grandement responsables de l'abandon prématuré du projet de construction des SST. Clark est, quant à lui, plus mesuré. Comme nous le faisons dans la section suivante, il préfère insister sur le fait qu'il fut « particulièrement facile [pour les décideurs politiques] d'exploiter le conseil des experts [scientifiques] dans un cas de ce type, pour lequel la probabilité d'occurrence était faible, et les coûts [environnementaux encourus] étaient élevés » (situation d'expertise que les historiens des sciences désignent aujourd'hui sous le nom de « science post-normale »)[225], le tout sur fond de grogne contre les coûts économiques exorbitants du programme SST. [Clark, 1974, pp. 417 & 432]

Ian Clark n'infirme pas l'atmosphère d'urgence qui a présidé à l'élaboration de la théorie de la destruction de l'ozone par les SST. Mais, comme Erik Conway après lui (Conway, 2008), il en fait une lecture nuancée, non polémique. Il rappelle que d'autres études avaient été réalisées à l'époque, qui laissaient entendre qu'une production massive d'avions stratosphériques induirait des émissions suffisamment importantes pour altérer la physico-chimie de la stratosphère. Même si c'était surtout la variable température atmosphérique moyenne globale qui intéressait 'in fine', la faible quantité d'ozone de la stratosphère laissait suspecter une certaine fragilité de la couche d'ozone. Retranscrivant un discours scientifique, Clark écrit :

> "La stratosphère est plus raréfiée et plus réactive photochimiquement que la basse atmosphère, si bien qu'une petite quantité de polluant pourrait avoir un effet beaucoup plus important sur la composition gazeuse de l'air. » [Clark, 1974, p. 418]

[225] L'expression « science post-normale » a initialement été forgée par Silvio Funtowicz et Jerome Ravetz, qui cherchaient à caractériser une méthode de recherche scientifique adaptée à des cas particuliers où « les faits sont incertains, les valeurs discutables, les enjeux élevés, et les décisions urgentes » [Funtowicz & Ravetz, 1991]. Comme le soulignent Lisa Dilling et Rachel Hauser dans un article sur « la gouvernance de la recherche en géoingénierie » : dans une telle situation, il devient, de manière manifeste, « impossible de maintenir l'artificialité de la séparation entre science et son usage potentiel en société (Funtowicz & Ravetz, 1993 ; Gibbons, 1999 ; Sarewitz, 2010) ». [Dilling & Hauser, 2013]

En effet, l'hypothèse d'une possible altération de la couche d'ozone « était dans l'air » dès la fin des années 1960 (comme se justifiera Halstead Harrison).

Toutefois, nous pouvons objecter que, jusqu'au moment où l'alerte surgit, en 1969-70, et même jusqu'en 1971, aucune des figures reconnues de la science de l'ozone (Chapman, Nicolet, Dobson, Crutzen, *etc.*) ne s'est jamais émue de la vulnérabilité de la couche d'ozone. Après lecture des récits autobiographiques de Harrison et Johnston, et surtout des travaux d'historiens d'Erik Conway (Conway, 2008) et de Mel Horwitch (Horwitch, 1982, "Clipped wings: the American SST conflict"), il devient patent qu'Ian Clark accorde trop de poids à l'expertise scientifique dans la décision du Congrès de 1971. La plupart des analyses et des témoignages que nous avons rencontrés indiquent que, en 1970 et au début de l'année 1971, théâtre des deux votes de chaque assemblée du Congrès, le débat politique portait en priorité sur l'économie, les priorités nationales, et les bangs supersoniques [Johnston, 1992, p. 14]. Clark insiste donc, nous semble-t-il, de manière exagérée sur la force de l'argument catastrophiste proféré par quelques scientifiques au sujet de la destruction de la couche d'ozone. Il surestime manifestement l'autorité des quelques rares études sur les impacts des SST sur le climat global et l'ozone stratosphérique (voir Clark, 1974, p. 418 : "These facts […] SST aircraft"). Il cherche même à identifier un consensus scientifique sur la dangerosité des NO_x issus des SST qui aurait été atteint avant le vote dirimant du Sénat le 19 mai 1971. Clark affirme ainsi que, dès mars 1971, un tel consensus aurait été dégagé par des spécialistes de la stratosphère (lesquels ?, ceci n'est pas spécifié) – de « vrais experts » que Clark oppose aux 'outsiders' du rapport SCEP. Il écrit :

> « La conférence de 1970 consacrée à l'Etude des Problèmes Environnementaux Critiques (SCEP), à laquelle avaient assisté des chimistes et des météorologistes qui n'étaient pas familiers avec la stratosphère, avaient conclu que les émissions de NO_x des SST pouvaient être négligés (*Man's Impact on the Global Environment...*, p. 69). Lorsque la question de l'ozone stratosphérique eut acquis une reconnaissance suffisante pour que de vrais experts ('real experts') s'y intéressent, une réunion d'experts triés sur le volet ('well-chosen experts') se tint en mars 1971 (Meeting of experts in Boulder, Colorado, called by the Commerce Technical Advisory Board (unpublished)). Ceux-ci comprirent presque immédiatement le problème : la destruction de l'ozone par la catalyse des NO_x serait le principal danger stratosphérique lié aux SST. » [Clark, 1974, p. 425][226]

[226] Il ne semble pas que Clark fasse ici usage d'ironie, puisqu'il ne met pas entre guillemets « 'real experts' » ou « 'well-chosen experts' ». Un doute subsiste toutefois. Maureen Christie, commentant ce passage, déclarait, perplexe, que « même après l'avoir lu à de multiples reprises, elle n'[était] toujours pas certaine de saisir le degré de sarcasme ('tongue-in-cheek sarcasm […] intended') » de l'auteur. [Christie, 2000, p. 26]

Or, le chercheur qui a le plus loin testé l'hypothèse de la destruction de l'ozone stratosphérique par les NO_x en mars 1971, et celui qui publiera le premier sur la question en août 1971 est Johnston, c'est-à-dire précisément un 'outsider', puisqu'il est chimiste de la troposphère (voir Sous-chapitre 4.2) ! Et surtout, l'hypothèse est bel et bien mise en doute à l'époque par des chercheurs présumé compétents sur ces questions. Elle continuera à être contestée dans les années suivantes, y compris par les spécialistes de l'ozone stratosphérique les plus illustres (comme en témoigne par exemple la recension que fait Nicolet, 1978). Comme l'a établi l'historienne des sciences Maureen Christie, Phil Goldsmith et ses collègues du 'Meteorological Office' de Bracknell (R-U) publièrent en 1973 un article retentissant dans la revue *Nature* ("Nitrogen Oxides, Nuclear Weapon Testing, Concorde and Stratospheric Ozone"). Ils y montraient qu'aucune corrélation ne pouvait être établie entre les essais nucléaires atmosphériques de 1957-63, qui constituaient une importante injection directe de NO_x dans la stratosphère, et les niveaux d'ozone d'alors, qui étaient pourtant déjà mesurés de manière systématique à travers le monde. Or, poursuivaient les auteurs, même une grande flotte d'avions supersoniques ne produirait pas un apport de NO_x suffisant pour atteindre les niveaux des essais nucléaires de 1961-62. Plus généralement, poursuit Christie, au-delà du travail de Goldsmith et ses collègues, il apparut de plus en plus probable au milieu des années 1970 que l'apport de NO_x stratosphériques par des avions demeurerait toujours très faible par rapport à celui présent ou généré par des phénomènes naturels ; et donc, que les NO_x issus de l'aéronautique contribueraient seulement pour une part infime au mécanisme de destruction d'ozone stratosphérique (mécanisme qui est permanent, rappelons-le, de manière naturelle ; voir notre Chapitre 1). [Christie, 2000, pp. 26-27]

Le fait que l'alerte à la destruction de l'ozone ait été la dernière objection de poids mise sur la table avant le vote du Congrès a pu laisser penser que cette subite alerte a été le tournant de la controverse. Or, en regardant de plus près la succession chronologique des événements de l'affaire de l'ozone en 1970-1971, on peut difficilement défendre une telle version. En effet, le vote du Sénat qui met fin au projet SST eut lieu le 19 mai 1971.[227] Or, « au moins jusqu'en

[227] Le Congrès des Etats-Unis se prononça en fait deux fois au sujet de la continuation du programme SST, en l'espace de six mois. D'abord, un premier vote eut lieu fin 1970. La Chambre des Représentants approuva massivement la poursuite du financement du programme SST. Mais, quelques jours plus tard, le 3 décembre 1970, le Sénat vota contre.

La prolongation du programme SST fut de nouveau ouverte au vote en 1971. La Chambre des Représentants se prononça en faveur de l'arrêt du financement fédéral pour les SST (à 215 contre 204), le 18 mars 1971 (devant s'appliquer dès le 30 mars). Le Président républicain Nixon (investi début 1970) et son gouvernement menèrent alors une campagne de soutien pour la perpétuation du projet SST, particulièrement vive au début du mois de mai. Le 13 mai 1971, la Chambre des Représentants vota en faveur du nouveau projet soumis. Mais, six jours plus tard, 19 mai 1971, un nouveau vote du Sénat plaida en sa défaveur, et enterra définitivement le programme SST [Johnston, 1992, pp. 16 & 22]. Précisons que, en janvier 1971, le Congrès avait été renouvelé (passage du 91ème au

avril 1971, rapporte Harold Johnston, les agences gouvernementales états-uniennes concernées par [le problème de la destruction d'ozone] acceptaient [les] conclusions du rapport SCEP » du MIT, selon lesquelles la quantité de NO_x dans la stratosphère, et donc la dangerosité du SST, étaient « négligeables ».[228] Les conclusions du SCEP furent peut-être remises en question à partir d'avril 1971 ; mais, évidemment, aucun consensus sur quelque haute nocivité des SST n'émergea, subitement, entre avril et mai 1971 ! Comment croire que, lors du vote de mai 1971, le Congrès suivît la conviction de quelques scientifiques, isolés et non expérimentés dans la science de l'ozone stratosphérique pour la plupart (à l'exception de Conway Leovy, qui avait commis en 1968 un mémorandum de 28 pages intitulé *Atmospheric ozone : an analytic model for photochemistry in the presence of water vapor*, et témoigna ensuite devant le Congrès)[229], contre l'avis des agences gouvernementales qui ne voyaient pas de raison de mettre en doute à ce stade les conclusions du groupe du SCEP publiées quelques

---

92ème Congrès). Mais, la part des élus démocrates et républicains avait peu fluctuée. Avec, dans les deux cas, une faible majorité démocrate.

[228] Johnston, 1971 :

> "At least as late as April 1971, U.S. governmental agencies concerned with this problem accepted two conclusions of the SCEP report: (i) NOx from the SST would build up to mole fraction values between $6.8*10^{-9}$ and $6.8*10^{-8}$ in the stratosphere, and (ii) these amounts of NO_x "may be neglected."

Et, le but de l'article de Johnston était précisément de réfuter cette vision :

> "The purpose of this report [article] is to point out that if concentrations of NO and NO_2 are increased in the stratosphere by the amounts accepted by the SCEP report and by governmental agencies, then there would [actually] be a major reduction in the O_3 shield (by about a factor of 2 even when allowance is made for less NO_x emission than SCEP used) [… – even if] the effect of NO_x on the O_3 shield may turn out to be less, or greater, than that indicated here." [Johnston, 1971, p. 522]

[229] Comme James McDonald, Harold Johnston et Halstead Harrison, Conway Leovy et Julius London avaient "témoigné" devant le Congrès. D'après Harrison, Swihart de Boeing les aurait alors publiquement accusés tous cinq d'avoir dissimulé des informations qui tendaient à prouver que le SST ne mettaient *pas* en danger la stratosphère [Harrison, 2003, p. 28].

Membre de l'"American Geophysical Union' dès 1961, Conway Leovy (1933-2011) avait débuté sa carrière dans la prévision du temps (pour l'"US Air Force', principalement), avant d'obtenir un PhD de 'Meteorology' au MIT, puis d'intégrer la 'RAND Corporation'. C'est là qu'il avait commencé à travailler sur les atmosphères planétaires, son domaine de prédilection par la suite. Ses études étaient particulièrement focalisées sur la dynamique mésosphérique et l'étude des couches limites planétaires, mais également la chimie de l'ozone. Bien qu'ayant obtenu un PhD de 'Meteorology' (MIT, 1963), il avait étudié les atmosphères globales des planètes dans les années 1960, en particulier de Mars, à la faveur des missions *Mariner* de la NASA (Ex : Leovy C. B. & Mintz Y., 1969, "Numerical Simulation of the Atmospheric Circulation and Climate on Mars", *J. Atmos. Sci.*, 26, pp. 1167-1190). Mais surtout, sous financement RAND/US Air Force, il avait mené une étude sur l'ozone terrestre, publié sous la forme d'un mémorandum de 28 pages (1968, *Atmospheric ozone : an analytic model for photochemistry in the presence of water vapor*, Collection : Research memorandum (Rand Corporation), "Supported by the U.S. Air Force under Project Rand - Contract No. F44620-67-C-0045"). Leovy put donc légitimement apporter son expertise au Sénat sur les effets destructeurs du transport supersonique sur l'ozone, au début des années 1970 [Catling, 2011, p. 363]. Harrison avait utilisé les résultats de Leovy pour réaliser ses modélisations de 1968-70 sur l'ozone.

Quant à Julius London (1917–2009), ses recherches et son enseignement couvrirent principalement les champs de la météorologie et de la climatologie, avec une insistance particulière sur « la science des radiations, l'ozone atmosphérique, la climatologie des nuages et les études soleil-climat ». Au début des années 1960, il intégra définitivement l'Astro-Geophysics (qui s'appella ensuite l'Astrophysical and Planetary Sciences Department) de l'Université du Colorado (Boulder), qu'il dirigea entre 1966 et 1969. Il deviendra aussi 'Fellow of AMS'. Durant les mois qui précèdent ou suivent son audition devant le Congrès, London sera promu au sein de l'International Radiation Commission (IRC ; ICSU), dont il deviendra le Président (1971-79), après avoir été son secrétaire entre 1963 et 71). [Woods *et al.*, 2012]

Enfin, Johnston et Harrison étaient également hautement considérés par leurs pairs. Le premier avait été élu à la NAS en 1965, et le second était membre de l'"American Meteorological Society'. En revanche, ils n'étaient pas des spécialistes de *l'atmosphère globale*.

mois plus tôt par le groupe réuni autour du président de l'American Meteorological Society (AMS), William Kellogg ? Comment imaginer que le Congrès annulât un projet aussi prestigieux, alors qu'il pouvait attendre quelques mois voire quelques années une expertise collégiale mieux référencée sur la destruction anthropique de l'ozone, sachant qu'uniquement des prototypes volaient pour l'heure (ils étaient donc en nombre très réduits, donc bénins pour la couche d'ozone) ? Pourquoi, de plus, les Etats-Unis ne se lancèrent-ils pas alors dans le développement d'un nouveau type d'avion supersonique, qui épargnerait la couche d'ozone ?

Nous ne pouvons ici fournir des explications détaillées et définitives aux raisons des votes du Congrès. Par contre, la succession des évènements au cours des mois décisifs de mars à mai 1971 infirme que la diffusion de l'hypothèse de Harrison et des risques de cancers fût décisive. Que s'est-il passé, en effet ? Après s'être prononcée en faveur du projet fin 1970, la Chambre des Représentants des Etats-Unis vote en sa défaveur le 17 mars 1971. Ce vote a donc eu lieu *préalablement à* la diffusion de l'hypothèse de Johnston. L'historien Erik Conway insiste : ce vote du 17 mars 1971 a eu lieu « pour des raisons économiques, et non pour des raisons environnementales » [Conway Erik, 2005, *High-speed Dreams. NASA and the Technopolitics of Supersonic Transportation, 1945-1999* **in** Oreskes & Conway, 2010, pp. 109-110]. Ensuite, dans les semaines qui suivent, l'administration Nixon cherche à relancer le programme SST. La Chambre des Représentants fait volte-face, et vote en sa faveur, en date du 13 mai 1971. La suite est connue : un brouillon de Harold Johnston "fuite" quatre jours plus tard, soit deux jours seulement avant le vote du Sénat, le 19 mai 1971. Mais, là encore, comme nous l'avons expliqué précédemment, les Sénateurs mettront plus en avant les coûts économiques que les coûts environnementaux pour expliquer leur décision de voter contre la prolongation du programme SST. [Johnston, 1992, pp. 21-22]

Certes, il est indéniable que des arguments environnementaux, tels que les 'sonic booms', les modifications de la dynamique et du climat stratosphériques et la destruction de l'ozone, furent brandis lors des débats publics de 1970-71, et donnèrent une caution morale au vote du Congrès. D'abord, dès 1967, des mouvements civiques avaient fait entendre leur voix aux Etats-Unis et au Royaume-Uni, pour protester contre les 'sonic booms' et contre le bruit des SST au décollage et à l'atterrissage. Puis, en mars 1968, Vincent Schaefer, l'un des pionniers de la modification du temps (voir Chapitre 2), devenu par ce biais un spécialiste de la modélisation des nuages, et alors directeur de l''Atmospheric Research Center of the United State University of New York' (à Albany), avait mis en garde contre le fait que, du fait du faible potentiel de mélange entre les altitudes où voleraient les SST et les niveaux supérieurs et inférieurs, quelque brume persistante de vapeur d'eau pourrait se créer, qui

pourrait obstruer l'ensoleillement et altérer le temps et le climat global (le rapport de la NAS de 1966 avait en revanche jugé ce phénomène improbable). Suivirent des avis d'experts mettant en garde contre le risque de changement climatique global, discrédités plus ou moins efficacement par l'administration Nixon, et l'entrée dans l'arène de la 'Coalition against the SST' et de 'Friends of the Earth' de en 1969 et 1970, avant même que la menace de destruction de la couche d'ozone ne devienne un sujet important [Dewey, 1992, p. 350]. Plus généralement, le climat politique états-unien était favorable à des déclarations en faveur de la protection environnementale, et allant dans le sens d'un ralentissement de la conquête technologique de la "nature". Clark signale ainsi de nombreux points communs entre la controverse sur les avions supersoniques et les plus marquantes « controverses sur des questions technologiques » de l'époque aux Etats-Unis (sur les tests souterrains de bombes thermonucléaires à Amchitka (29 octobre 1965, second tir le 2 octobre 1965, le dernier tir le 6 novembre 1971) et sur le lieu d'implantation des centrales nucléaires), ou encore sur « l'utilisation de nouveaux médicaments » [Clark, 1974, p. 417].

Toutefois, les travaux sur la controverse sociotechnique de 1969-71 sur les SST civils aux Etats-Unis apportent un faisceau d'indices, qui indiquent que, même sans ce travail d'alerte environnementale, le projet SST aurait peut-être, et même très vraisemblablement, été abandonné. Comme l'ont montré plusieurs travaux, la question de la destruction de l'ozone stratosphérique ne pesa pas plus – sinon moins – dans la balance, que les autres risques environnementaux (nuisances sonores et climat), et moins, en tout cas, que les risques économiques (car pas de retour sur investissements, voire le creusement d'un gouffre financier). En 1970, les industriels (Boeing et sous-traitants) avaient revu à la hausse leurs besoins financiers pour la construction de leurs deux prototypes SST [Roan, 1989, pp. 13-15 ; Clark, 1974, pp. 418 & 431-432]. En outre, l'accumulation des trois difficultés (ozone, autres risques environnementaux, risques économiques), auxquels s'ajoutaient les risques inhérents à la sécurité des vols, eut sans doute un effet rhétorique persuasif. En d'autres termes, dans le cas de cette controverse états-unienne au sujet des SST, des arguments multiples furent conviés, sans qu'aucun d'eux n'eût sans doute pu faire, seul, la décision (tout le moins, aussi rapidement).[230]

[230] Par ailleurs, la balance ne pencha jamais de manière impérieuse, dans un camp ou dans l'autre. Clark rapporte :

> « [La controverse] commença [dès l'annonce du projet de construction de SST civils au] début des années 1960 [par le gouvernement des Etats-Unis…] Les principaux arguments en faveur du développement des SST étaient les contributions à la défense nationale, le prestige national, la vitesse de ce nouveau mode de transport, [les possibles exportations de la technologie qui devraient aider à atteindre un excédent de] la balance des paiements, et la bonne santé de l'industrie aérospatiale. Les principaux arguments contre concernaient les hauts coûts du projet qui porteraient sur le dos des imposés, le bruit que ces avions générerait dans les aéroports et à proximité, et lorsqu'ils émettraient des 'booms' supersoniques en franchissant le mur du son, et enfin les effets délétères sur l'environnement : bruit ; pollution de l'air ; mal fait à l'atmosphère.

Stopper un programme de production industrielle de grande envergure, fruits de rémunérations pour de nombreux employés, est un processus coûteux socialement. Mais investir un demi-milliard de dollars supplémentaire dans le projet SST, comme la question se posa au tournant des années 1970, avait refroidi de nombreux décideurs. Beaucoup de membres du Congrès états-unien avaient perdu foi dans les perspectives d'avenir des vols supersoniques stratosphériques. A l'inverse des décideurs français et britannique, qui allaient perpétuer leur programme Concorde, ils décidèrent alors de ne pas prendre plus longtemps le risque du SST.

En définitive, pour parler comme Callon, Lascoumes et Barthes, les « incertitudes sociales » avaient sans doute été tout aussi décisives que les « incertitudes scientifiques ». Mais, comme c'est le cas ici, il est souvent difficile de pouvoir apprécier le poids des unes ou des autres. En effet, les discours « sociaux » intègrent toujours des arguments « techniques » (scientifiques) pour emporter la conviction. De même, réciproquement, les discours techniques sur les pollutions (qui vont finir par tomber sur une nécessité de normes, qui renvoient au vivant… donc à une prise de risque sociale) ne s'affranchissent jamais de considérations axiologiques ou sociales (comme le formule Clark de manière quelque peu brutale : « Les bénéfices de l'utilisation des SST [font-ils le poids] face aux coûts qu'entraîneront les cancers de la peau ? » [Clark, 1974, p. 419]).[231] Il faut donc se contenter de conclure de nouveau que, au cours d'une controverse de ce type, que Callon, Lascoumes et Barthes nomment « controverse sociotechnique », le tracé de la frontière entre ce qui relève de l'« indiscutablement technique » et ce qui relève de l'« indiscutablement social » « ne cesse de fluctuer. » [Callon *et al.*, 2001, p. 45]

Sur le caractère "technocratique" de la gouvernance des SST, la catastrophe environnementale et le principe de précaution, et le "dévoiement" de l'expertise scientifique

L'étude du Politiste canadien Ian Clark sur « le conseil expert dans la controverse sur les SST aux Etats-Unis » (1974), dans laquelle nous avons déjà puisé, nous fournit de précieux éléments de réflexion sur l'expertise scientifique de la destruction de la couche d'ozone en

> « Les défenseurs du projet peuvent être caractérisés comme ceux qui étaient séduits par l'avion lui-même, ou par l'argent que pouvait engendrer la construction de l'avion. En fait, il était impossible de distinguer les deux attirances chez la plupart des promoteurs du projet, qu'ils soient des sénateurs d'Etats où étaient implantés des industries aérospatiales, des industriels ou des fonctionnaires. Les opposants étaient ceux qui s'inquiétaient des coûts du programme ou des effets secondaires des SST sur l'environnement. Les défenseurs parvinrent à persuader quatre présidents successifs d'apporter leur soutien au programme (Eisenhower, Kennedy, Johnson et Nixon). » [Clark, 1974, pp. 416-417]

[231] Dans les débats sur les SST en 1970-71, un tel dilemme est formulé, mais jamais, à notre connaissance, en termes d'analyse coût-bénéfice (CBA) quantitative traduite en dollars (de type : quels bénéfices tirer des SST ? *vs* quel coût pour la prévention et la protection contre les UV et pour le traitement des cancers de la peau ?).

1970-71. Ils demeurent, de plus, pour la plupart, pertinents pour les controverses des deux décennies suivantes, jusqu'au bannissement total et mondial des CFC décidé en 1992, par amendement du Protocole de Montréal (1987) – à l'exception près, importante, que les négociations se font alors au niveau international (voir Chapitre 7). « Le transport supersonique, juge Clark, fournit un excellent objet pour l'examen du rôle des experts dans la prise de décisions gouvernementales. La controverse sur le programme SST s'est déployée sur une décennie [1963-1973], poursuit-il, et a beaucoup retenu l'attention du grand public au cours de ces dernières années [(1970-1973)]. De nombreux experts scientifiques furent placés sous les projecteurs, et prononcèrent un large ensemble de témoignages lors d'auditions devant le Congrès. La croyance selon laquelle ces scientifiques, qui incluaient des physiciens, des ingénieurs et des économistes, eurent un impact important sur la décision du Congrès d'annuler le programme au printemps 1971, est largement partagée. » [Clark, 1974, p. 416]

Nous l'avons dit, Clark ne réfute nullement cette croyance ; il la tempère, tout au plus. En outre, désireux de ne pas tomber dans le manichéisme des visions de son époque, qui estimaient le comportement de ces scientifiques, soit « exemplaire » (car ils avaient alerté la société civile), soit « mauvais » (« leur conseil politiquement motivé [aurait prouvé] que les profanes ('laymen') ne pouvaient pas escompter que les scientifiques [fussent] objectifs à l'extérieur de leurs laboratoires »), l'auteur « vise à décrire certaines des expertises ('advise') qu'ils donnèrent, afin d'élucider les complexités inhérentes aux relations entre experts ('advisors') scientifiques et ceux qu'ils conseillent » [Clark, 1974, p. 416]. Il ne s'agit donc pas pour Clark de chercher à trancher, en vain, entre une attitude "rigoureusement neutre" et une attitude "profondément idéologique" des experts scientifiques.[232] La charge culturelle ou

[232] L'approche de Clark présente trois caractéristiques qui lui donnent toute sa place au sein de notre travail. Premièrement, sa visée est semblable à celle des analystes STS de « controverses sociotechniques » (*cf.* Callon *et al.*, 2001). Cependant, Clark déclare qu'il souhaite montrer que, si « en principe, au moins, il est possible de maintenir les avis ('views') des experts scientifiques séparés des avis ('views') politiques de ceux qui ont la responsabilité des décisions [politiques] », il fut en tout cas « difficile de maintenir une telle distinction en pratique », dans le cas de la controverse sur le SST. » Nous jugeons une telle formulation problématique à plusieurs égards : l'emploi du terme 'views' (s'agit-il de savoirs du même type ?) ; le fait que les scientifiques soient traités comme s'ils n'avaient pas fait le choix eux-mêmes de témoigner devant le Congrès, et vivaient de plus dans une sphère culturelle totalement étrangère à celle du monde politique (ce n'est pas le cas, donc ceci annihile dès le départ la possibilité que, même « en principe », les avis « scientifiques » et « politiques » puissent être « séparés »). Nous doutons en effet pour notre part que le partage moderne entre "science" (nature) et "politique" (culture) pût jamais être réalisé parfaitement… L'affirmation d'un tel partage est même parfaitement indéfendable, au sujet du travail des acteurs que nous avons suivis dans la controverse sur les STS aux Etats-Unis, en 1970-71, où des intérêts évidents de compétitivité économique, de clan politique, de budgets scientifiques et de R&D, *etc.* entraient en ligne de compte, ainsi que l'émergence d'un programme environnemental au sein de la communauté des scientifiques de l'atmosphère et du climat. (Au contraire, Clark pense que :

> "In every issue which arose in the controversy about the SST, it would have been possible to pose the questions in such a way as to allow experts to give technical answers, and then allow the constitutionally determined government officials and politicians to make their choices among alternative policies." [Clark, 1974, p. 430])

idéologique existe toujours, quel que soit l'expert. Il s'agit alors, non simplement de typifier et de jauger le poids de cette "charge" sur certains experts particuliers, mais de l'inscrire dans un contexte culturel et politique plus général (et non de s'attarder sur des détails idiosyncratiques à un expert). Nous garderons trois points de l'analyse de Clark.

Premièrement, Ian Clark met en exergue la nature « technocratique » du débat. Le Politiste canadien assure qu'« une caractéristique importante resta inchangée tout au long du déroulement de la controverse : les problèmes furent débattus en termes de fait technologique, plutôt que de préférences politiques ultimes » (ce qui eut pour effet, 'ipso facto', de « garder les experts [scientifiques] au cœur de l'attention », précise-t-il).[233] Malheureusement, une fois ce constat fait, Clark ne développe guère le volet normatif de son projet – *i.e.* il dépeint imparfaitement les conditions de réalisation de son idéal de "démocratie technique" (*cf.* Callon *et al.*, 2001).[234]

Deuxièmement, en matière de sémantique et d'acteurs engagés, la controverse des SST aux Etats-Unis inaugure un type pérenne de débats sur les risques environnementaux *à l'échelle nationale*. Nous nous trouvons ici en présence de la première prise en compte d'une "*catastrophe environnementale globale d'origine anthropique*" dans un processus de décision gouvernementale. L'aspect catastrophe environnementale *d'origine anthropique* n'avait guère d'autres antécédents que la Bombe, capable d'anéantir durablement la vie sur un territoire régional étendu, et les fictions sur de potentiels déploiements futurs de technologies de modification du temps et du climat à grande échelle. Contrairement à la catastrophe environnementale de type "naturel" (éruption volcanique, inondation, tempête), on pensait pouvoir agir aisément sur des causes d'origine industrielle. Quant à l'aspect *global*, il ne faisait qu'ajouter un caractère dramatique à une affaire SST dans les faits très américano-américaine. A cause de sa courte durée et de l'enjeu sans doute secondaire qu'y joua la destruction de l'ozone, la controverse de 1970-71 ne s'embarrassa pas des problèmes de

Deuxièmement, le travail de Clark est focalisé sur la figure de l'expert scientifique, l'une des figures que nous avons mises au cœur de notre travail de thèse.

Troisièmement, l'article de Clark date de 1974. Aussi, Clark analyse-t-il la controverse close de 1970-1971 avec un certain recul critique (certes, sans doute insuffisamment important), *mais* sans être "parasité" par les incarnations politiques multiples qui suivront sur l'environnement global – à commencer par la controverse sur les CFC, qui éclatera suite à l'article Molina et Rowland, publié au cours de la même année 1974 –, parasitage qui a pu amener plus tard les analystes à juger de manière erronée l'affaire des SST, comme "expliquée" par-dessus tout, soit par l'apport de "preuves scientifiques incontestables", soit par quelque "tournant environnementaliste" – événement historique qu'ils omettent, de surcroît, de typifier précisément. (On trouve ces biais, de manière répétée, par exemple chez Andersen & Sarma, 2002 (voir par exemple, p. 197), ou chez Dotto & Schiff, 1978.)

[233] Alors que Clark met, dans son article, les experts scientifiques au cœur de son récit, dans son long ouvrage "Clipped Wings: The American SST Conflict", la spécialiste en stratégie des entreprises Mel Horwitch se focalise quant à elle sur les décideurs politiques, et plus généralement ceux qu'elle nomme « bureaucrates » (ainsi que, dans une moindre mesure, sur les militants environnementalistes) [Horwitch, 1982].

[234] Pour un travail normatif récent sur l'expertise scientifique, nous renvoyons à Collins & Evans, 2002.

coopération internationale que poserait quelque gouvernance future de l'ozone (problèmes dont certains scientifiques de l'atmosphère avaient par contre discuté *in abstracto* au sujet de projets de géoingénierie, dans les années 1950-70 ; voir Chapitres 2 & 8).

Par contre, pour que des conséquences cataclysmiques aussi incertaines acquièrent droit de cité, il fallait qu'une culture du risque environnemental fût en germe. C'était de fait le cas comme nous l'avons dit, surtout aux Etats-Unis, mais aussi déjà à l'époque avec un rayonnement international. Les « technologies » devenaient des facteurs multi-« risques », à des échelles d'espace et de temps croissants. Une tension dynamique naissait, entre un discours et des techniques de gestion du risque environnemental développés notamment par des experts scientifiques publics et des industriels (pour l'épuration des fumées d'usines, par exemple), et un discours mobilisateur plus patrimonial en provenance des ONG ou de l'ONU ('Friends of the Earth' fut fondé en 1969 ; la tenue prochaine de l'UNCHE de Stockholm fut annoncée dès 1967). Dans un même mouvement, la définition du "plastique" principe de précaution devenait un enjeu de pouvoir (nous reviendrons sur ce point dans le Chapitre 5).

Clark caractérise, en outre, la problématique en jeu comme « *à probabilité faible - coûts élevés* ». Au plus fort de la controverse sur les SST, des catastrophes de type sécurité (hublot cassé), ou économique (déficits extraordinaires dans les comptes états-uniens relatifs au transport civil), furent évoqués. « Mais, les possibles catastrophes qui reçurent la plus importante couverture médiatique furent les catastrophes environnementales », affirme Ian Clark. Et, en particulier le risque de destruction de l'ozone, qui pourrait induire un nombre spectaculaire de cancers de la peau (*cf.* l'audition de McDonald), ou provoquer une épidémie de cécité dans le monde animal (*cf.* le brouillon de Johnston)[235]. Si « le public de la controverse s'élargit rapidement » en 1970 et surtout au début de l'année 1971, poursuit Clark, ce fut à la fois pour « sa signification comme centre d'attention symbolique du conflit [plus général, qui existait à l'époque] entre défenseurs de la technologie et de la croissance contre ceux qui défendaient une "réévaluation des priorités" et une protection environnementale », et du fait de « la nature spectaculaire des possibles dégâts » [Clark, 1974, pp. 417-418]. Cet « élargissement », toutefois, fut limité, et non décisif dans la décision du Congrès de 1971, nous l'avons montré.

[235] Clark écrit :

> "The SST would do two things differently from commercial subsonic planes. First, it would produce a continuous sonic boom and, second, it would fly in the stratosphere. Experts pointed out that the environmental impact of each of these was highly uncertain and each might conceivably have disastrous consequences. It was asserted that the sonic boom might obliterate whole species of animal life by cracking the eggs of cliff-dwelling birds or by disturbing the organisms near the surface of the oceans. Stratospheric pollution, it was said, might change global climate or produce skin cancer, or both." [Clark, 1974, p. 418]

Troisièmement, Clark disserte sur "l'exploitation politique" des travaux scientifiques. Durant toute la durée des débats politiques, en 1970-1971, écrit-il, les experts scientifiques furent au centre de toutes les attentions. Parmi eux, les experts de l'ozone. Or, prétend le Politiste, les conseils experts sur des problèmes tels qu'un changement climatique global rapide ou une destruction de la couche d'ozone protectrice, qui sont « connectés […] à des conséquences cataclysmiques », dont « l'occurrence ne peut être prédite avec certitude, ni même avec une très forte probabilité » – ceux de la « science post-normale », comme nous la nommons aujourd'hui –, sont ceux qui sont « sujets à la pire "exploitation" », au pire dévoiement intéressé [Clark, 1974, pp. 417-419]. L'exploitation politique du brouillon de Harrison par le Membre du Congrès Reuss, en 1970, en avait été une première expression. L'exploitation médiatique du brouillon de Johnston, qui avait "fuité" en 1971 avant qu'il ne soit finalisé et publié (et donc n'avait pas suivi l'intégralité de la procédure de contrôle par les pairs) en donne également une éblouissante illustration.

James McDonald ne regretta pas d'avoir brandi le spectre des nombreux cancers de la peau qui pourraient advenir en cas de développement d'une grande flotte SST.[236] En revanche, Harold Johnston déplora que son brouillon destiné à *Science*, proposant l'hypothèse d'un aveuglement du monde animal, eût été divulgué à son insu. Il était en effet revenu rapidement sur sa première idée de l'inclure dans son article, et se défend par ailleurs d'avoir communiqué lui-même l'hypothèse à des journalistes pour la faire diffuser dans l'arène médiatique… et donc, plus généralement, d'avoir participé en sous main au travail de sape contre le vote de relance du projet SST. Il avait été vigilant, se défendra-t-il, ne communiquant ses brouillons qu'à une dizaine de personnes, qu'il pensait de confiance [Johnston, 1992, pp. 20-23]. Dans son article de *Science*, Johnston préférera mettre en garde de manière allusive contre les « sévères radiations inférieures à 300 nanomètres qui s'infiltreraient dans la basse atmosphère » (« Sévères » ('harsh') car capables d'induire des cécités ?, des cancers ?... Johnston ne forge plus d'hypothèse) [Johnston, 1971, p. 518]. Son texte de *Nature* se présentera en outre, non comme une alerte, mais comme une réponse critique au rapport SCEP du MIT sur la question du rôle des NO_x dans la chimie de l'ozone – même si, il est vrai, Johnston insiste bel et bien sur le caractère alarmant de ses résultats, et utilise la métaphore du « bouclier d'ozone » (sur laquelle nous reviendrons) [Johnston, 1971, p. 14].[237]

---

[236] Sa biographe Ann Druffel montre que la conviction de McDonald était faite, et qu'il s'y tint malgré des retours sceptiques de ses pairs, et après son passage devant le Congrès où il avait été violemment pris à partie par des membres du Congrès (le 2 mars 1971). Pour plus de détails, voir Druffel, 2003, pp. 488-505.

[237] Johnston conclut ainsi son article de 1971 :

> "The purpose of this report is to point out that if concentrations of NO and NO_2 are increased in the stratosphere by the amounts accepted by the SCEP report and by governmental agencies, then there would be a major reduction in the O_3 shield (by about a factor of 2 even when allowance is made for less NO_x

Par contraste avec les expertises globales au sein du complexe « militaire-industriel-universitaire » états-unien ou soviétique, qui étaient pensées en premier lieu pour la défense nationale et n'étaient donc diffusées que très partiellement dans la littérature en libre accès, et par conséquent peu relayées dans les médias, les évènements de 1970-71 montrent la naissance d'une activité d'expertise scientifique environnementale sur l'atmosphère globale se voulant "transparente", qui posa dès le début, avec force, la question de la "responsabilité" des scientifiques. Celle-ci fut en effet mise en cause, notamment parce que les travaux scientifiques qui furent diffusés étaient à peine ébauchés, et bénéficiaient de peu de soutien collégial. Parallèlement, fut soulevé le problème de responsabilité des médias à les diffuser, et aux élus à les brandir dans l'arène politique.

Toutefois, ajoutons-nous, toute injonction à la responsabilité est problématique, car corrélative d'une contestation de valeurs et/ou d'intérêts… En outre, "l'ouverture démocratique des débats environnementaux à la société civile" recouvre autant de réalités qu'il existe de controverses sociotechniques. Nous avons simplement cherché à illustrer, dans ce premier Sous-Chapitre, combien les travaux des scientifiques de l'atmosphère peuvent devenir des arguments parmi d'autres, négociables avec d'autres savoirs, lorsqu'ils quittent l'arène des sciences de la nature. Il n'est en effet jamais possible de tracer une ligne de partage parfaite entre une nature déterministe, avec laquelle on ne négocie pas, et une politique, téléologique et négociée.

4.2. L'alerte sur les CFC de Mario Molina et Sherwood Rowland (1974)

Aussi peu robuste que soit l'hypothèse d'une destruction significative de la couche d'ozone par les NO_x émis par les SST, et aussi peu déterminante qu'elle ait pu être dans la décision finale du Sénat, l'affaire de 1970-71 a créé un précédent. Il s'agit, d'abord, d'un précédent politique, puisque la destruction de l'ozone a été invoquée par certains décideurs politiques comme l'une des raisons pour lesquelles ils ont renoncé au programme SST, et le jeune mouvement social sur l'environnement global présente parfois cet abandon comme sa

emission than SCEP used). However, the purpose of this report is not to say precisely by what factor the O_3 shield will be reduced by SST operation, but rather to point out that the variable (NO_x) that has been discounted is much more important that the variable (H_2O) that has been given so much attention. Just as the SCEP report incorrectly discounted NO_x and the SST planners for several years overlooked the catalytic potential of NO_x, it is quite possible (and, in fact, highly probable) that I have overlooked some factors, and the effects of NO_x on the O_3 shield may turn out to be less, or greater, than indicated here." [Johnston, 1971, p. 14]

victoire [Horwitch, 1982]. En outre, dans les années qui suivront l'hypothèse de destruction de l'ozone par les CFC en 1974, le contraste sera saisissant, entre la pression importante qui s'exercera sur les élites dirigeantes des pays du nord de l'Europe et des Etats-Unis, et la pression presque nulle en Allemagne, en France et au Royaume-Uni.

Le contexte outre-Atlantique s'explique en premier lieu par le fait que, aux États-Unis, l'arrêt du programme SST s'est fait en partie au nom de la protection de la couche d'ozone.[238] Il provient, ensuite, du fait que les scientifiques états-uniens ont, non seulement subi la pression d'un impératif de résultats sur l'action anthropique sur l'ozone, mais ont également pris cette menace plus au sérieux que leurs homologues européens. Aux Etats-Unis plus qu'ailleurs, les hypothèses de Harrison et Johnston ont mis la stratosphère sous les feux des projecteurs de la science de l'atmosphère, et créé une émulation dans l'arène scientifique, notamment par la formation d'une arène experte. Un programme nommé CIAP ('Climate Impacts Assessment Program') est créé dès 1971 (placé sous l'autorité du 'Department of Transportation' (DoT) et de l'Académie des Sciences des Etats-Unis (NAS)). Il jouera principalement le rôle de groupe d'expertise sur l'impact de l'homme sur l'ozone stratosphérique, jusqu'à son terme à la fin de l'année 1975.[239]

Par ailleurs, le tournant des sciences de l'atmosphère vers des programmes environnementaux est déjà en marche. Les études sur les pollutions régionales se sont par ailleurs intensifiées dans les années 1960. En 1960, le 'Division of Air Pollution' de l'U.S. Public Health Service' fédéral a un budget total de seulement $4 millions ; seules quatre-vingt quatre municipalités et seulement huit Etats mènent des programmes de pollution de l'air, et près de 60% du total de $10 millions est dépensé en Californie. En 1970, les cinquante Etats ont leur programme propre, et des normes de qualité de l'air à l'échelle nationale sont mises en place par l'*US EPA* en 1970 (NAAQS, 'National Ambient Air Quality Standards'). Les dépenses nationales continuent d'augmenter. En 1980, le budget de l'*EPA* alloué aux

[238] Le clivage entre Etats-uniens et Européens, hérité de l'époque de l'affaire des SST, allait perdurer jusque dans les négociations du Protocole de Montréal. La sociologue des sciences Karen Litfin, auteure d'un ouvrage sur les « discours de l'ozone », relate que, dans les années 1970, « après que le programme états-unien fut privé de ses fonds et que la question des droits d'atterrissage des SST britanniques et français devint la priorité, les Européens accusèrent les Américains de tenter d'exporter leurs normes environnementales afin de servir leurs intérêts économiques de manière déguisée. Une allégation qui retentit de nouveau lors du processus de négociation du Protocole de Montréal » au cours des années 1985-87. [Litfin, 1994, chapter 3, pp. 7-8 of 18].

Nous revenons sur l'attitude des Européens dans les années 1970 dans le Chapitre 6, mais en nous limitant au travail des scientifiques de l'atmosphère européens.

[239] Le 'Climatic Impacts Assessment Program' (CIAP) fut créé en 1971, au lendemain des débats au Congrès sur l'abandon du projet SST, mais avant les publications sur les possibles atteintes à la couche d'ozone par les navettes spatiales et les CFC de 1972. A ses débuts, « bien que chargé « de déterminer les contraintes réglementaires nécessaires pour s'assurer que les futurs vols stratosphériques […] n'auraient pas d'effets environnementaux indésirables », la plupart des efforts du CIAP allèrent au financement de la recherche nécessaire pour réaliser cette expertise », rapporte l'historien Edward Parson. De 1971 à 1975, la CIAP dépensa 23 millions de dollar et impliqua plus de mille scientifiques issus d'universités, du gouvernement, ainsi que de l'industrie (dont un nombre important de firmes aérospatiales). Le CIAP se focalisa subitement sur les CFC à partir de la fin de l'année 1974. En tout et pour tout, la production littéraire des six panels du CIAP s'éleva à 9000 pages environ. [Parson, 2003, pp. 27-28]

pollutions de l'air dépasse les $230 millions (répartis entre la « R&D », « les réductions et la maîtrise » des pollutions, les frais administratifs, les activités scientifiques à l'étranger, *etc.*) [Bachmann, 2007, p. 662 ; *EPA*, 2014 (1980), pp. 4-7)].

La plupart des scientifiques de l'atmosphère qui vont travailler sur la destruction anthropique de l'ozone proviennent, néanmoins, d'une autre tradition, celle de la météorologie et du climat à grande échelle. Le NCAR (1960-…) a lancé un programme sur le changement climatique d'origine anthropique. Et, en 1971, on retrouve le météorologiste et climatologue Kellogg, alors président de l''American Meteorological Society' et qui vient de diriger le groupe climat du SCEP (été 1970), aux prises avec l'un de ses collègues du NCAR, le météorologiste McDonald. Comme l'a montré l'historien Joshua Howe, dès le milieu des années 1960, Kellogg et certains de ses collègues de l'élite des sciences de l'atmosphère perçoivent le problème de la pollution de la stratosphère par les SST comme un programme de recherche intéressant, et de surcroît non-belligérant, attribut que de nombreux scientifiques mettent en avant, dans un contexte de Détente entre les deux Blocs. Kellogg et ses collègues de l'Académie des sciences mentionnent le problème en 1965, et des calculs de modélisations numériques sont effectués au 'Geophysical Fluid Dynamic Laboratory' du 'Weather Bureau' (Princeton) à la même époque. En 1970-71, Kellogg appelle à la prudence : « lorsque vous changez quelque chose à une échelle globale, vous devez faire attention », aurait-il déclaré au début du moins d'août 1970 à un journaliste du *LA Times*. Toutefois, si Kellogg exprimera par la suite de grandes inquiétudes au sujet du changement climatique et de la destruction de l'ozone à partir du milieu des années 1970, il ne voit pas encore de preuves convaincantes que les SST provoquent de tels phénomènes (comme nous l'avons déjà indiqué). Il clame son agnosticisme, notamment lors de son audition par le Congrès au début du mois de mars 1971, et appelle les décideurs politiques à « décider l'issue des SST sur des bases plus significatives que l'effet sur l'environnement ». [Howe, 2010, pp. 79-80 ; Kellogg, 1970-71 **in** Howe, 2010, pp. 85-86]

De fait, l'alerte ne viendra pas de météorologistes mais de *chimistes* : soit des théoriciens des phénomènes chimiques troposphériques (ou "chimistes de la troposphère) ; soit des chimistes de laboratoire. Dans le Sous-chapitre 4.1, nous avons déjà pu souligner la formation de chimiste de Halstead Harrison. Dans le présent Sous-chapitre 4.2, nous revenons sur le caractère décisif de la formation de chimiste de la troposphère de Harold Johnston (1920-2012), et de sa pratique de spécialiste des pollutions de l'air. Nous mettons en exergue la filiation entre lui, le lanceur d'alerte (un peu malgré lui, dans un premier temps) sur les SST, et les deux auteurs de l'alerte sur les CFC, Franklin Sherwood Rowland (1927-2012) et Mario Molina (1943-…), des chimistes de laboratoire, *i.e.* des chimistes de formation, de nouveau.

La culture environnementale du chimiste des smogs troposphériques Harold Johnston

Les aéronomes laissent un vide dans lequel s'engouffrent les météorologistes et les chimistes

Comme nous en avons rendu compte dans les chapitres précédants, « l'aéronomie chimique » (par opposition à une « aéronomie physique »), et en particulier la chimie de l'ozone stratosphérique, s'est grandement étoffée à partir de la fin des années 1950. Sur la base d'un déficit explicatif du cycle de Chapman, et au fil de l'identification de nouveaux composés dans la stratosphère, des aéronomes tels que Wulf, Nicolet, Bates ou Crutzen ont développé pour la stratosphère une chimie réactive de plus en plus foisonnante, alors que la chimie stratosphérique était jusqu'alors restreinte au seul cycle de Chapman. Dans un article de 1962, "the OH Nightglow Emission", L. Wallace du 'Yerkes Observatory' ne liste pas moins de dix-huit équations-bilans impliquant des allotropes de l'oxygène, qui pourraient s'appliquer à la haute atmosphère [Wallace, 1962]. Les réactions photochimiques sont au cœur de l'épistémologie chimique de la stratosphère qui se déploie. Certaines sont directement inspirées de théories établies pour la haute atmosphère, à l'image de ce qui s'était passé pour l'édification du premier cycle par Chapman.

Dans les Chapitres 1 et 2, nous avons par ailleurs indiqué que, à la fin des années 1950, Arie Jan Haagen-Smit (1900-1977) a de son côté développé un modèle de chimie réactive pour la *troposphère* afin d'expliquer le smog californien. Son travail a été effectué largement indépendamment des travaux des aéronomes. Il est, en outre, tout à fait remarquable d'observer que les champs d'étude des aéronomes-chimistes et des chimistes des pollutions urbaines s'ignorent encore grandement pendant toute la décennie 1960 (et même, dans une moindre mesure, au-delà). Néanmoins, parmi les quelques rares chimistes de la troposphère qui s'intéressent à la problématique de l'ozone stratosphérique à partir de la fin des années 1960, figure Harold Johnston, qui se réclame de l'héritage d'A.J. Haagen-Smit ; or, son entrée dans le giron des aéronomes fut fracassante.

Si, en 1970-71, en l'espace des quelques mois précédant le second vote du Congrès, une "multi-individualité" des experts scientifiques émerge, nous nous situons toujours dans *une phase "héroïque", individualisée, de l'expertise*, où aucun groupe d'experts n'existe.[240] De plus,

[240] Même les travaux de synthèse commandés et publiés par les agences fédérales ont peine à trouver plus d'une référence sur le sujet des impacts environnementaux du SST. Ainsi, dans la « Partie 4 : Développement du Transport Supersonique » des auditions de 1970 devant le 'Subcommittee on Economy in Government of the Joint Economic Committee' du Congrès, on ne trouve guère que la référence aux travaux de Russel Train, qui avait mis en garde la même année sur la possibilité que les SST affectent le bilan radiatif de l'atmosphère [Hearings before the Subcommittee on Economy in Government of the Joint Economic Committee, Congress of the United States. Part

les meilleurs spécialistes de l'ozone ont été "pris de court" par l'alerte, ils n'ont pas encore pris position. Dans cette situation de "vacance du pouvoir", le Congrès fait appel en 1970-71 à des météorologistes (Kellogg, McDonald, *etc.*), qui ont la plus longue expérience des impacts des SST sur la stratosphère, auxquels ils se sont intéressés à partir du milieu des années 1960, peu après les débuts du programme SST en 1963. Mais, Kellogg ne pense pas qu'une destruction importante de la couche d'ozone puisse avoir lieu. Quant à McDonald, qui a l'intuition contraire, il ne possède pas les armes théoriques pour élaborer une théorie de la destruction chimique de l'ozone. Dans ce contexte, c'est un *chimiste de laboratoire et modélisateur chez Boeing*, Halstead Harrison, qui s'essaie le premier à une hypothèse de destruction de la couche d'ozone, par la vapeur d'eau (Harrison, 1970). Dans la foulée, un *chimiste de la troposphère*, Harold Johnston, bâtit et diffuse le premier travail de référence sur la destruction anthropique de la couche d'ozone (cette fois, par les NO_x). Débuté au milieu de l'année 1970, son travail s'incarnera, nous l'avons dit, un an plus tard, dans l'article "Reduction of Stratospheric Ozone by Nitrogen Oxide. Catalysts from Supersonic Transport Exhaust" publié dans la revue *Science* (Johnston, 1971).

Une mutation épistémologique de la stratosphère calquée sur celle de la troposphère une quinzaine d'années auparavant

Diplômé de chimie physique puis de météorologie, Harold Johnston réalise des études diverses sur les pollutions de l'air, dès ses premiers pas dans la recherche au début des années 1940.[241] En 1952, Harold Johnston collabore avec Richard Cadle à la construction d'un

---

4: Supersonic Transport Development, 7, 11, 12 May, 1970 (Washington, D.C. : U.S. Government Printing Office, 1970), p. 1000 **in** Clark, 1974, p. 418]

[241] En 1941, à l'âge de vingt-et-un ans, Johnston obtient son diplôme universitaire de chimie de l'Université d'Emory. Au cours de la même année, il intègre le 'California Institute of Technology' comme étudiant de troisième cycle. Toutefois, l'avènement de la Seconde Guerre mondiale le conduit vers un poste de météorologiste. Il s'agit d'une poste civil, mais rattaché à une unité de l'US Army sur les territoires californiens et floridiens. Aussi, les travaux de Johnston portent-ils principalement sur la prévention des attaques chimiques aériennes. Le chimiste étudie successivement :

- « les effets de substances chimiques volatiles toxiques sur différents types de charbon » (le charbon était candidat pour être utilisé comme filtre dans les masques à gaz), sur le charbon de bois » ;
- « la trajectoire et la dispersion des nuages gazeux sous différentes conditions, en vue d'évaluer la vulnérabilité des régions côtières aux attaques chimiques » ;
- « dans quelle mesure la dispersion du gaz (généré par des explosions-tests) est affectée par les changements météorologiques ».

Ce n'est qu'après la guerre que Johnston peut écrire sa thèse "On the reaction between ozone, a naturally occurring form of oxygen, and nitrogen dioxide, a pollutant formed during combustion" (Ph.D. in chemistry and physics ; 1948). Ce travail poursuit une partie de ses travaux belligérants. La chimie gazeuse qu'il y développe trouve des exemples dans l'air du laboratoire comme dans l'air extérieur. Par contre, il ne s'agit pas alors pour Johnston de faire des liens avec la chimie stratosphérique.

Johnston passe les années 1950 à 1956 "dans le laboratoire", « recherchant les limites de haute et basse pression de réactions unimoléculaires, recherches étendues lors des dix années suivantes [à] des réactions bimoléculaires élémentaires ». Après neuf années passées dans la recherche et l'enseignement supérieur à l'Université de Stanford (1947-1956), puis un an au California Institute of Technology (1956-1957), il devient finalement conférencier (enseignant-chercheur) en chimie à l'Université de Californie, à Berkeley, en 1957. Il travaille alors de nouveau spécifiquement sur des questions de pollution de l'air. En 1966, il est, de plus, nommé 'Principal Investigator' du

mécanisme d'explication du smog photochimique par la formation et l'action chimique de radicaux libres (Cadle R. & Jonhston H., 1952, "Chemical Reactions in Los Angeles Smog", *Proc. of the 2nd National Air Pollution Symposium*, Pasadena, California, Sept. 1952, pp. 28-34). Johnston inscrit déjà son travail dans la droite ligne du chimiste E.W.R. Steacie (Président du 'National Research Council' du Canada entre 1952 et 1962), et surtout d'Arie Haagen-Smit, un chimiste néerlandais qui a émigré dans l'ouest des Etats-Unis. Les études de Haagen-Smit et de ses successeurs avaient fait de la Californie l'un des premiers girons de la chimie troposphérique, notamment par le truchement d'études sur les émissions des véhicules motorisés dans l'agglomération de Los Angeles, qui contribuaient à la formation d'un smog photochimique.[242] A la fin des années 1950, Johnston rejoint Berkeley pour travailler exclusivement sur les pollutions troposphériques. [Johnston, 1992, pp. 6-11]

Haagen-Smit avait fait de la photochimie impliquant des composés organiques l'explication du smog de Los Angeles ; Johnston ferait des réactions impliquant des radicaux libres (OH, principalement) le cœur de sa photochimie de la troposphère. Ses travaux sur le smog californien, publiés à partir de 1952, feront la réputation de Johnston. Il se verra décerner en 1974 le *Pollution Control Award* de l'*American Chemical Society*. Au cours des décennies 1960 et 1970, son travail tournera principalement autour de l'élaboration de normes de qualité de l'air. « Depuis l'année 1952, déclarera son ancien collègue de l'Université de Californie Ronald Cohen, « le travail de Johnston n'a eu de cesse de démontrer l'importance de processus photochimiques élémentaires et de la catalyse des radicaux libres, dans la construction d'une description adéquate de la composition atmosphérique et dans la compréhension des effets attestés ou potentiels de l'activité de

---

'Lawrence Berkeley Laboratory'. [www.bookrags.com/biography/harold-s-johnston-woc (12/06/2012) ; Johnston, 1992, p. 6]

[242] Johnston rencontra Haagen-Smit, mais ne fut pas son étudiant. Il ne collabora pas non plus directement avec lui. Plus qu'un disciple de Haagen-Smit, Johnston fut celui qui reprit fièrement son flambeau, à une époque (au début des années 1950) où Haagen-Smit était décrié par une partie de sa communauté des scientifiques de pollutions atmosphériques. Johnston écrit :

> "During World War II, Los Angeles citizens reported eye irritation from thin white fogs that spread out from the butadiene factories, according to the local newspapers. After the war, these complaints multiplied, and the affected much of the Los Angeles basin. The eye-irritating fogs were identified as air pollutants and named "smog". Sulfur dioxide air pollution is a chemical reductant; smog is an oxidant. Many farmers who grew fresh vegetables and flowers found their crops spoiled from "new plant diseases." Arie J. Haagen-Smit, Professor of Biochemistry at Cal Tech, took an interest in the damage to plants, which he ascribed to smog. Haagen-Smit's mechanism was ozone production by ultraviolet photolysis of nitrogen dioxide; ozone reaction with olefins to produce ozonides, aldehydes, and aerosols; and nitrogen dioxide regeneration by Bodenstein's (1918) reaction of nitric oxide with oxygen […].
>
> "Stanford Research Institute (SRI) hired me as a part-time consultant and asked me to write a review of Haagen-Smit's "theory". The SRI managers and workers on the smog project were scornful of Haagen-Smit. They said that his work was irreproductible, his statements were illogical, and his motivation was publicity. My job was apparently to correct the mistakes of a sloppy, if not fraudulent, scientist, but I quickly concluded that Haagen-Smit's results were valid and that he was exceptionally creative."

Johnston reformulera le mécanisme avec Richard Cadle (que nous avons rencontré dans le Chapitre 3), dans un article de 1952 intitulé "Chemical Reactions in Los Angeles Smog" – comme indiqué dans le texte, *supra*. [Johnston, 1992, pp. 10-11]

l'homme sur l'atmosphère » [Cohen, 1998]. Dans les années 1960, Johnston est membre du panel du 'President's Science Advisory Board on Atmospheric Sciences' et du panel de la 'National Academy of Sciences (NAS)' pour le 'National Bureau of Standards of air pollution'. Johnston prend ensuite part au comité du 'California Statewide Air Pollution Research Center' et au '*NAS* Committee on Motor Vehicle Emissions' pendant les années 1970 [Lerner K.L. & Lerner B.W. (Ed.), 2003].

Nous voyons donc, premièrement, que la question de la destruction de l'ozone stratosphérique par les SST ne fut pour Johnston qu'une activité épisodique. Elle le mobilisa, de fait, uniquement dans la première moitié des années 1970. Deuxièmement, au moment où il lança l'alerte en 1971, Johnston était une personnalité scientifique influente dans l'une des disciplines de sciences de l'atmosphère, la chimie troposphérique. Il avait même intégré l'interdisciplinaire et influente Académie des sciences des Etats-Unis (NAS) en 1965, ce qui lui donnait une stature scientifique importante.

Dans son article, Ian Clark laisse entendre que la facilité avec laquelle certains scientifiques ont cru en la possibilité d'une destruction de la couche d'ozone en 1970-71, alors qu'aucune catastrophe environnementale globale rapide et chimique n'avait jusqu'alors été prise au sérieux par la communauté scientifique, pourrait avoir trait à la "*nature*" de la stratosphère. Selon lui, les scientifiques jugeaient que « la stratosphère [était] plus raréfiée [chimiquement] et plus réactive photochimiquement que la basse atmosphère, si bien qu'une faible quantité de polluants pourrait avoir un effet bien plus important sur la composition gazeuse de l'air » [Clark, 1974, p. 418]. Mais, ceci ne nous explique pas pourquoi ce furent des chimistes de la troposphère voire des météorologistes (M. McDonald), et non des aéronomes théoriciens de la chimie stratosphérique, qui forcèrent le verrou de l'immuabilité de la couche d'ozone.[243] Il faut donc trouver des causes "*sociales, culturelles*" à cet évènement.

La croyance dans la possibilité d'une destruction de la couche d'ozone s'explique d'abord dans un cadre général de mutation épistémologique des sciences de l'atmosphère, que nous avons décrit dans le Chapitre 3. Le point le plus important tient au fait que certains processus de l'environnement global sont à présent pensés comme se déployant dans de *faibles temporalités*. Or, l'origine disciplinaire des théoriciens de la destruction de l'ozone jusqu'au début de l'année 1971 est révélatrice : aucun n'est initialement spécialiste de la stratosphère, mais de disciplines qui étudient traditionnellement des phénomènes aux

[243] Comme nous l'avons dit, les aéronomes physiciens de formation ne s'étaient guère inquiétés de la fragilité chimique de l'ozone stratosphérique, au cours des années 1960. Il faut toutefois modérer le scepticisme des spécialistes de la stratosphère. Certains se sont mobilisés très rapidement, à partir de 1971. Parmi eux, certains (Leovy et London) prirent même fait en cause contre le développement des SST Etats-Unis, devant le Congrès en 1971. Puis, Paul Crutzen prit rapidement l'hypothèse de Johnston au sérieux, après la parution de son article. Voir notre Chapitre 6.

temporalités plus faibles que les aéronomes. Soit, la météorologie (Wexler, McDonald) ; soit, la chimie de laboratoire et de la chimie de la troposphère (Harrison, Johnston).

Ensuite, la *croyance en une réactivité importante de l'atmosphère (car dans une chimie atmosphérique qui serait très complexe et labile)*, ainsi que dans le *pouvoir de l'homme* à provoquer de spectaculaires phénomènes environnementaux, s'était accru avec les travaux de Haagen-Smit, qui avait corrélé le smog californien aux émissions automobiles. Certes, au cours des décennies 1950-60, la théorie photochimique de Haagen-Smit demeura âprement contestée au sein de la communauté scientifique, notamment par l'influent chimiste de Stanford, Philip Leighton (1897-1983 ; auteur de l'ouvrage de référence *Photochemistry of Air Pollution* en 1961). Mais, Haagen-Smit avait été "le maître à penser" de Johnston dans les années 1950 (et le travail de Haagen-Smit restait à ses yeux d'une grande actualité, quarante ans plus tard, malgré les volontaires incompréhensions de quelques uns « dont les affaires ('business interests') avaient été dérangées par les découvertes » du chimiste néerlandais, maugréerait Johnston dans son article autobiographique) [Johnston, 1992, pp. 10-13].

Or, il n'y avait qu'un pas à faire pour passer de la formation des smogs photochimiques troposphériques riches en ozone, liée aux gaz d'échappement des automobiles, à la chimie de l'ozone stratosphérique liée aux émissions des moteurs des engins aéronautiques. Johnston fit ce pas, lorsque le rôle des NO_x dans la chimie de l'ozone stratosphérique fut suggéré lors de la conférence de l'été 1970 sur les conséquences du SST, présidée par William Kellogg, à laquelle il assista. Johnston était en effet l'un des meilleurs spécialistes des NO_x atmosphériques, famille de composés chimiques qui jouait un rôle central dans la photochimie responsable des smogs photochimiques.[244]

En définitive, la présentation qu'Ian Clark fait des savoirs scientifiques sur la stratosphère se fait donc le relai des raisonnements tels qu'ils furent alors formulés, *non par tous les scientifiques*, mais *par le chimiste Harold Johnston*, qui travaillait sur des phénomènes troposphériques qu'il pensait semblables. Clark écrit en effet :

> « La stratosphère se trouve dans un état permanent d'inversion de température, où le mélange atmosphérique [*i.e.* la dispersion des polluants] est très lent – de la même manière que lorsque, dans une situation temporaire d'inversion de

[244] Si, au tournant des années 1970, le NO_2 n'inquiète nullement pour son impact sur l'ozone stratosphérique, ni pour sa participation au réchauffement climatique (plus tard, le NO_2 sera reconnu comme quatrième gaz à effet de serre par le Protocole de Kyoto en 1997), sa toxicité dans les airs urbains est reconnue, et l'hypothèse de sa contribution à l'acidité des pluies est déjà prise au sérieux.

R. Cohen rend hommage en ces termes au travail de Johnston :

> « Au cours de son beau travail sur la cinétique fondamentale des oxydes d'azote, [Harold Johnston] examina et quantifia de manière systématique les NO, NO_2, NO_3, N_2O_5, and HNO_3. Ces études de laboratoire sur la photochimie des oxydes d'azote constituent un corpus qui frayèrent la voie à un progrès rapide dans la chimie atmosphérique relative à ces gaz. » [Cohen, 1998]

température, le "smog" se retrouve piégé à proximité du sol, sur une ville. De plus, la stratosphère est plus raréfiée [chimiquement] et plus réactive photochimiquement que la basse atmosphère, si bien qu'une faible quantité de polluant pourrait avoir un effet beaucoup plus important sur la composition gazeuse de l'air. » [Clark, 1974, p. 418]

Johnston aurait tout à fait pu écrire ces phrases en 1970 ou 1971.

En 1992, Johnston faisait toujours usage de cette analogie entre troposphère et stratosphère (que de nombreux auteurs ont, en outre, reprise), projetant dans la stratosphère les schèmes qu'il utilisait pour la troposphère. La stratosphère, écrivait-il, est en inversion de température (par rapport au haut de la troposphère, dont la température est inférieure), tout comme la couche vers 1-2 kilomètres d'altitude qui se forme pour permettre la formation de smog dans la région inférieure, est en inversion de température par rapport à cette dernière :

« Le bassin de Los Angeles subit régulièrement des inversions de température à grande échelle, lorsque l'air de surface, refroidi au contact de l'Océan Pacifique, transite du large vers le continent, faisant s'élever l'air qui avait été précédemment réchauffé par les surfaces exposées au soleil. La stratosphère entière est en inversion de température. » [Johnston, 1992, p. 6]

… Par contre, parce que le rapport relatif NO_x/O_3 et plus généralement les régimes physico-chimiques que décrit Johnston ne sont pas les mêmes dans la troposphère et la stratosphère, une augmentation de NO_x dans la stratosphère a tendance à occasionner une destruction d'ozone, là où elle a tendance à produire de l'ozone dans la troposphère, comme c'est le cas typiquement lors de la formation d'un smog photochimique riche en ozone dans les villes. Les mécanismes de réactivité chimique à prendre en compte de manière prépondérante sont liés à des conditions atmosphériques particulières (radiations solaires, caractéristiques météorologiques, concentrations des composés atmosphériques, climat). La modification de ces conditions induit parfois des mutations vers de nouveaux « régimes » physico-chimiques, dans lesquels les composés chimiques atmosphériques font montre de "comportements" radicalement différents, que cherchent à décrire les chimistes de l'atmosphère. Selon eux, le comportement du couple « NO_x/O_3 » que décrit Johnston est le plus fréquent : les NO_x catalysent la production d'ozone dans la troposphère, alors qu'ils le détruisent dans la stratosphère. (Nous n'entrerons évidemment pas ici dans les détails techniques relatifs aux différents régimes physico-chimiques atmosphériques). [Sportisse, 2008, p. 172]

Dans son article paru dans *Science* le 6 août 1971, Johnston attribue le plus grand pouvoir de destruction d'ozone aux oxydes d'azote (plutôt qu'incriminer la vapeur d'eau, comme

l'avaient fait Harrison, 1970, et Park & London, 1971). Une analogie est faite avec les interactions entre NO_x et composés oxygénés, proposées par Nicolet pour la *haute* atmosphère. En outre, l'hypothèse de Crutzen, qui a énoncé il y a peu un schème réactif où les NO_x détruisent l'ozone stratosphérique (*cf.* Crutzen, 1970), est citée dans Johnston, 1971. Pourtant, dans ses brouillons du mois d'avril 1971, Johnston avait pu élaborer son schème de réactions chimiques expliquant la destruction de l'ozone stratosphérique par les NO_x, sans pour autant connaître les travaux de Crutzen. Par ailleurs, il n'utilise pas les résultats numériques de l'aéronome néerlandais. Il ne faut pas confondre la fabrication de la confiance (citer les aéronomes, car ils sont les figures traditionnelles d'autorité sur l'ozone stratosphérique) avec la salle des machines de Johnston, qui est celle d'un théoricien de la chimie troposphérique. [Johnston, 1992, pp. 20-21 ; Johnston, 1971]

De manière plus générale, la trajectoire universitaire et les dires autobiographiques[245] de Johnston révèlent que la foi en son hypothèse dut beaucoup au champ disciplinaire dont il provenait. Dans le cadre de la conférence des 18-19 mars 1971, il avait proposé son hypothèse de destruction de l'ozone stratosphérique par les NO_x des SST. Mais, sa « motion » fut « ajournée », affirmera Johnston ; des suites de quoi, « le 'Panel of the Department of Commerce Technical Advisory Board' appuya formellement la conclusion que les NO_x pouvaient être négligés dans la photochimie de la stratosphère » [Jonhston, 1992, p. 19]. Voyant que sa proposition était massivement rejetée, Johnston aurait pourtant vivement protesté en petit comité, finissant par inciter les autres chimistes à lutter avec lui pour défendre son idée – ne serait-ce que par « légitime défense », résument Oreskes et Conway, d'après le récit de l'un de ces autres chimistes présents à la conférence, Harold Schiff (le co-auteur de Dotto & Schiff, 1978, *the Ozone War*) [Schiff, 1978, pp. 39-68 **in** Oreskes & Conway, 2008, p. 109].[246]

---

[245] Nous utilisons un article de trente pages, publié en 1992 dans *the Annual Review of Physical Chemistry*, que Harold Johnston décrit ainsi :

> "This account is my personal perspective on atmospheric ozone and on some of the events that have advanced this field of science. My point of view is that of a physical chemist, in particular that of a photochemist. […] I illustrate the mechanics by which new scientific developments interact with society, business, and politics. I quote conversation in the interdisciplinary Tower of Babel. For the physical chemist who is not expert in atmospheric sciences, I plant a number of educational packages between the anecdotes." [Johnston, 1992, p. 1]

Johnston cherche notamment à réfuter les nombreuses contrevérités qui ont été dites au sujet de son implication dans l'agitation autour des SST destructeurs d'ozone, dans la période charnière de mars à mai 1971 :

> "In both published books and hearsay, there are some incorrect statements about what I said and did and what happened during these months [of March to May (or August) 1971]. I list important dates and briefly discuss some events." [Johnston, 1992, p. 19]

[246] Johnston précisera qu'on lui avait fait de nombreuses objections, dont le fait qu'il n'eût pas pris en compte « les mouvements atmosphériques ». Et, comment expliquait-il, par ailleurs, que les concentrations d'ozone avaient augmenté au cours des dix années qui venaient de s'écouler ? [Johnston, 1992, p. 18]. Pour d'autres éléments, tels que vécus par Johnston, au sujet du débat scientifique sur la destruction de l'ozone par les SST lors de la conférence, et au sujet de la nuit du 18 au 19 mars 1971 que le chimiste consacra à passer en revue des constantes de réactions et des temps de relaxation des réactions chimiques nécessaires à sa démonstration : voir Johnston, 1992, pp. 14-19.

Une culture de l'alerte et de la gestion des pollutions

Le spécialiste des pollutions de l'air qu'est Harold Johnston donne en 1971 une impulsion environnementale à la question de l'ozone stratosphérique, que les aéronomes de l'époque n'étaient pas capables de générer. La première raison tient au fait que, en tant que successeur de Haagen-Smit, qui avait contribué activement à l'élaboration de premières réglementations des pollutions responsables du smog californien après-guerre, Johnston cultive la rhétorique du risque sanitaire. Dans son article d'août 1971, publié dans *Science*, Johnston utilise dès le résumé un épithète donnant une valeur dépréciative à un objet habituellement "neutre" pour les scientifiques de l'atmosphère : « des radiations », qui sont qualifiées de « sévères » ("the harsh radiation") [Johnston, 1971, p. 517].

De plus, nous l'avons dit, Johnston avait dans un premier temps eut l'idée d'agiter un risque de catastrophe plus terrifiant encore : une cécité d'une partie ou de l'ensemble du monde animal. Johnston avait, certes, renoncé à réitérer cette hypothèse. Exposée dans le brouillon du 2 avril, elle fut, comme nous l'avons dit, retirée dans les jours qui suivirent, avant l'envoi d'un nouveau brouillon du 14 avril. Plus tard, il la qualifiera d'« idiotie », dans un cadre de légitimation de la scientificité de ses travaux d'alors. Il martèlera qu'il avait *subi* la fuite de ses travaux, et qu'ils avaient de surcroît été mal compris. Par ailleurs, il affirmera avoir répondu « indifféremment » (comprendre : sans choix idéologique) aux diverses sollicitations par la suite, à partir de juin 1971 (de la Maison Blanche, de la 'Citizen's League Against the Sonic Boom', du 'Cabinet Office' de Londres, de l''Anti-Concorde League', d'universités et d'industries) [Johnston, 1992, pp. 20 & 23].[247]

Pourtant, Johnston avait bel et bien envisagé, dans un premier temps, de parler de la cécité du monde animal. Et surtout, rapporte l'historien Erik Conway, dans la version suivante de son brouillon, qu'il envoya cette fois-ci à *Science*, le 14 avril 1971 (il sera révisé pour le 14 juin 1971), le ton demeurait trop « passionné » au goût des relecteurs [Conway, 2008, pp. 132-133]. Harold Schiff, qui participa au processus d'expertise de l'ozone aux côtés de Johnston dans les années 1970, affirmera en tout cas que les relecteurs dudit brouillon envoyé par avaient reproché à Johnston d'avoir fait usage de trop nombreuses références à des questions politiques (Johnston ne fait, toutefois, nulle mention de cette épisode). [Dotto & Schiff, 1978, p. 65 ; Johnston, 1992 ; Johnston, 2005 (1999)]

---

[247] Johnston, 1992 :

> "I had read about the effect of ultraviolet radiation on snowblindness, and I included a foolish statement about that in my draft article. A few days later, I removed the foolish statement, but it was too late. I [had] sent copies of the 2 April report to Hirschelfelder, London, Elliott, and three senior Berkeley professors for their review."
>
> "Since May 1971, I responded as helpfully as possible to all who requested information. With equal consideration, I sent out packages of information to the White House, the Citizen's League Against the Sonic Boom, the Cabinet Office of London, the Anti-Concorde League, universities, and industries." [Johnston, 1992, pp. 20 & 23]

Nous ne connaissons pas le contenu de ce brouillon du 14 avril 1971. Nous avons seulement la certitude qu'il évoquait la possibilité d'une augmentation des flux d'UV-B dangereux pour la santé humaine, mais pas l'allégation concernant la cécité. Par contre, il est intéressant de rapporter la remarque que fait Schiff au sujet de ces jugements par les pairs. Schiff propose en effet que le brouillon du 14 avril 1971 de Johnston aurait peut-être été accepté par des relecteurs de la fin des années 1970 (moment où Schiff écrit son livre avec Dotto), là où il avait été refusé en 1971. En d'autres termes, à la fin des années 1970, la rhétorique des sciences de l'atmosphère avait changé. D'après Schiff, on acceptait à présent dans le champ les « références à des questions politiques » – comprendre, à des questions politiques citoyennes, "médiatisables" – plus placidement [Dotto & Schiff, 1978, p. 65]. Et, ajoutons-nous, l'article de Johnston publié en août 1971, même épuré, avait probablement contribué à cette évolution.

En tout cas, nous pouvons faire l'hypothèse que, en tant que continuateur de l'œuvre de Haagen-Smit, et par opposition aux aéronomes, Johnston avait pleine conscience de son pouvoir d'élite à prendre part activement au gouvernement des pollutions. Il savait que ses alertes sanitaires, et ses alertes sur les atteintes faites aux plantes et aux animaux, pouvaient trouver des relais dans la société civile et auprès de décideurs politiques, qu'il pouvait s'intégrer dans un processus de gouvernance des pollutions, par le truchement de son expertise scientifique (inciter à la réduction de tel polluant, élaborer des normes, *etc.*)… D'autres, par la suite, comprendront en outre qu'« utiliser la peur » était devenu une tactique payante pour obtenir des financements, comme le déplorera le vieux Richard Scorer [Scorer, 1997, p. 618].

Devenu "suspect" suite à la fuite de son brouillon dans la presse juste avant le vote du Sénat, Johnston ne pourra le faire pleinement. Il se gardera de s'exposer médiatiquement. Toutefois, comme nous le verrons dans la section suivante, il sera sollicité, non seulement par Rowland et Molina de manière informelle, mais officiellement par le CIAP (1971-75) pour participer à ses travaux d'expertise. Il dirigera même le Chapitre 5 du rapport final du CIAP de 1975.[248] Dans les années 1970 et même jusqu'à la publication du grand rapport international sur l'ozone de 1985, Johnston demeure une personnalité importante de l'expertise sur la destruction de l'ozone par les CFC. Dix ans après sa participation aux travaux du CIAP sur les effets des SST et des CFC, en 1971-75, on retrouvera Harold Johnston comme co-directeur de rédaction du « Chapitre 13. Prédictions des changements d'Ozone par les modèles » du grand rapport international en trois volumes sur

[248] *Cf.* Johnston, H. S., D. Garvin, M. L. Corrin, P. J. Crutzen, R. J. Cvetanovic, D. D. Davis, E. S. Domalski, E. E. Ferguson, R. F. Hampson, R. D. Hudson, L. J. Kieffer, H. I. Schiff, R. L. Taylor, D. D. Wagman and R. T. Watson, 1975: Chemistry in the stratosphere, Chapter 5, CIAP Monograph 1. The Natural Stratosphere of 1974, DOT-TST-75-51, U.S. Department of Transportation, Climate Impact Assessment Program.

l'ozone stratosphérique [*WMO/UNEP/…*, 1985, p. 220bis]. En outre, Johnston intégrera divers comités sur les effets environnementaux de l'aviation (1972-75 : NAS, 'Committee on Ozone and Stratospheric Aviation' ; 1978-82 : 'Federal Aviation Administration's High Altitude Pollution Program' ; 1988-94 : NASA, 'Science Advisor to High-Speed Civil Transport Studies ; 1995-97 : 'NAS Panel on Atmospheric Effects of Aviation').

Pour conclure, les brouillons et même l'article de Johnston se démarquaient à deux égards de la tonalité des discours à laquelle s'en étaient tenus jusqu'ici les auteurs qui avaient écrit sur la stratosphère, c'est-à-dire des aéronomes physiciens ou météorologistes de formation : d'une part, par goût pour l'expertise, qu'il avait acquis en travaillant sur les pollutions urbaines ;[249] d'autre part, parce que, en étant chimiste des smogs, il croyait en la possibilité d'affectations significatives de l'homme sur la composition atmosphérique. Ainsi, dès le résumé de son article, Johnston énonce que

> *les émissions de NO_x de la flotte de SST « prévue » pourraient « réduire le bouclier d'ozone d'un facteur 2 environ, permettant ainsi aux délétères radiations de moins de 300 nanomètres de pénétrer dans la basse atmosphère. »* [Johnston, 1971, p. 517][250]

Nous voici en présence d'une rhétorique qui contraste avec les travaux des aéronomes, publication de Crutzen de 1970 comprise. Cette dernière concernait des émissions naturelles de N_2O, et n'alertait pas sur une éventuelle destruction de la couche d'ozone. Elle proposait simplement d'accélérer les recherches sur les processus de photodissociation du N_2O dans la moyenne atmosphère, qui pourraient expliquer « les distributions d'ozone sur une grande partie de la stratosphère » [Crutzen, 1970, p. 320]. Au contraire, Johnston donne une tonalité "sanitaire" et "environnementale" à son article. Plutôt que s'en tenir à un réductionnisme chimique (le rôle générique des NO_x dans la chimie de l'ozone stratosphérique), il met en exergue le cas des SST, avec des projections concernant ses extensions futures. Il va jusqu'à proposer une quantification du risque sanitaire et environnemental afférent.

---

[249] Il ne faut toutefois pas exagérer ce penchant de Johnston pour l'expertise, qui ne fut pas particulièrement prononcé par rapport à d'autres collègues, pas même vers la fin de sa carrière dans les années 1990. Johnston précisa, en outre, qu'« il ne pensait pas que [son département de chimie de l'Université de Berkeley…] ait jamais formulé une politique [incitant à travailler sur] une science appliquée pour la société. » [Johnston, 2005 (1999), p. 149]

[250] Johnston écrit :

> *"Although a great deal of attention has been given to the role of water vapor from supersonic aircraft transport (SST) exhaust in the stratosphere, oxides of nitrogen from SST exhaust pose a much greater threat to the ozone shield than does an increase in water.* […]
>
> "The role of the oxides of nitrogen in the upper atmosphere has been repeatedly considered by Nicolet, and Crutzen has called attention to the possible role of oxides of nitrogen in limiting stratospheric O_3. […]
>
> "*The projected increase in stratospheric oxides of nitrogen could reduce the ozone shield by about a factor of 2, thus permitting the harsh radiation below 300 nanometers to permeate the lower atmosphere."* [Johnston, 1971, pp. 517-518]

Quelques décennies plus tard, l'attitude de Johnston au cours de la controverse des SST sera montrée en exemple à la jeune génération des scientifiques de l'atmosphère. L'hommage que rendit Ronald Cohen, Conférencier en Chimie et en Science de la Terre et des Planètes de l'Université de Berkeley, à son prédécesseur Johnston, lors de la cérémonie de remise de la Médaille Roger Revelle au chimiste en 1998, témoigne du tournant axiologique effectué entre 1970 et les années 1990. Selon R. Cohen, les conclusions scientifiques de Johnston auraient été objet à controverse au début des années 1970, parce qu'elles « défiaient implicitement une activité industrielle [(en général) jusqu'alors] sans entrave ». En d'autres termes, elles opéraient une coupure épistémologique (*cf.* G. Bachelard), et une coupure particulière : celle qui conduit à une vision du monde où « les activités humaines peuvent avoir un impact environnemental rapide à l'échelle globale », écrit R. Cohen.[251] Traduction : les conclusions de Johnston constituaient une *réflexivité environnementale globale* inédite… Or, des historiens en ont clairement identifié des avatars au début du XIX^{ème} siècle (voir Chapitre 1). Mais surtout, Ronald Cohen nie la singularité historique de l'entreprise de Johnston, il la réinterprète *a posteriori*, avec des yeux de chercheur de la fin des années 1990.

Quelle fut, en effet, l'intention de Johnston lorsqu'il travailla sur l'action des NO_x des SST sur la couche d'ozone ? Certes, Johnston prit conscience que la couche d'ozone, parce qu'elle est en elle-même une entité circonscrite et pérenne, contrairement à l'air des villes, devient une *victime* environnementale, comme peut l'être par exemple une forêt exposée à des précipitations acides. Devenue victime, le "bien commun" "couche d'ozone" peut alors être élevé au rang d'objet patrimonial. Et, dans l'article de Johnston de 1971, l'appel à la défense de "l'objet patrimonial global" "couche d'ozone" est effectivement présent, par l'utilisation d'une métaphore visant à sensibiliser à la fragilité, donc au besoin de protection de la couche d'ozone – la métaphore du « bouclier » protecteur. Toutefois, cette incursion "patrimoniale"

[251] D'après Ronald Cohen, H. Johnston avait été en 1971, et resterait par la suite, « d'une honnêteté intellectuelle imperturbable », se montrant « impartial » et « responsable » dans la dispute sur les avions stratosphériques. De par son remarquable travail scientifique et « ses efforts pour communiquer ses résultats au public et aux décideurs politiques », Johnston avait fait honneur à sa profession de scientifique, et en particulier la profession de scientifique de la recherche publique. Il était un modèle à suivre pour les scientifiques des nouvelles générations, concluait Ronald Cohen :

> "Johnston is most widely recognized for his landmark paper that appeared in Science in 1971 and the studies that followed, which showed that nitrogen oxides emitted by aircraft directly into the stratosphere might cause substantial depletion of the Earth's ozone layer. He was thrust into the public spotlight with the publication of this paper, which was controversial both because of its profound scientific conclusion that human activities could have a rapid environmental impact on a global scale and because of its implicit challenge to unfettered industrial activity. Johnston is known for his unflappable intellectual honesty, even in the face of the harsh public criticism that followed this paper. He has continued to work toward an honest, unbiased, and responsible discussion of the effects of stratospheric aircraft. In this, he is motivated by a deep personal commitment about the responsibilities of scientists (especially those of us who work at public institutions) to the public that pays our salaries. The extraordinary insights presented in this 1971 paper, as well as Johnston's efforts to communicate the results to the public and policy-makers, led to a transformation in the state of stratospheric science, spurring the initial development of modern programs of stratospheric observation and modeling." [Cohen, 1998]

fut rare chez Johnston. De même, elle sera rare chez ses homologues chimistes Molina et Rowland, au cours des controverses de l'ozone des années 1970. Une explication pourrait tenir dans le fait que Johnston savait – ou avait appris au cours du processus d'apprentissage qu'avait constitué la controverse –, que sa crédibilité d'expert pourrait se trouver affaiblie s'il se lançait dans ce registre de discours "pseudo-scientifique". Une autre explication, arguons-nous, tient au fait que *la patrimonialisation de l'environnement global était étrangère à la culture des chimistes de laboratoire et des chimistes de la troposphère.*

Cette culture était par ailleurs, de manière plus générale, étrangère aux scientifiques de l'atmosphère. Il ne s'agit pas de contester qu'un processus de patrimonialisation de l'environnement global eût lieu à la fin des années 1960 et au début des années 1970. Comme Ronald Cohen et tous les scientifiques de l'atmosphère aujourd'hui, les historiens parlent d'un processus de patrimonialisation de l'environnement global à cette période (même s'il n'est qu'un processus particulier de patrimonialisation de l'environnement global parmi d'autres, et non le premier, ni l'unique). Par contre, *au tournant des années 1970*, ni les aéronomes, ni les météorologistes, ni les climatologues, ni les spécialistes des pollutions urbaines n'ont contribué de manière décisive à la tradition qui avait fait de l'environnement *global* un bien commun de l'humanité – et que l'on retrouve dans les déclarations des 'New Social Movements' environnementalistes naissants (ou de Richard Scorer, voir Sous-chapitre 5.3). En effet, depuis l'immédiat après-guerre[252] jusqu'au tournant des années 1970 au moins, malgré l'importante tradition d'études des scientifiques de l'atmosphère sur les retombées radioactives, la tradition scientifique d'alerte sur l'environnement à grande échelle voire global demeurait principalement l'œuvre de "biologistes".

En témoigne, par exemple, le célèbre rapport officieux publié en marge de l'UNCHE, *Only One Earth* (*Nous n'avons qu'une terre*). Ses rédacteurs en chef sont une économiste (Barbara Ward) et un microbiologiste (René Dubos), et la plupart des collaborateurs à l'ouvrage sont des biologistes et des écologues. Plus étonnant : bien que reconnaissant que la réalité des risques atmosphériques globaux soit sujette à caution au sein de la communauté scientifique, le changement climatique voire la destruction de l'ozone stratosphérique (qu'ils évoquent) étaient déjà devenus, sous la plume des auteurs, de sombres horizons probables parmi d'autres d'une humanité en train de s'emprisonner dans la finitude de son milieu. Les auteurs préparent ainsi, déjà, les décideurs à la forte éventualité d'un changement climatique global… au moment où les scientifiques de l'atmosphère et du climat demeurent très

[252] L'auteur de *Road to Survival* (1948), William Vogt, était ornithologue et membre de l'IUCN (Union internationale pour la conservation de la nature ; 1948-…). Fairfield Osborn, qui montrait l'Homme comme une nouvelle « force géologique », dans *Our Plundered Planet*, peut être appelé naturaliste. Julian S. Huxley, premier directeur de l'Unesco (1946-1949) et « promoteur d'une planification onusienne de la prospérité mondiale incluant un contrôle de la démographie, la conservation rationnelle des ressources et la protection de la faune et de la flore sauvages », était biologiste. [Mahrane *et al.*, 2012, p. 129]

circonspects sur la possibilité d'une catastrophe climatique globale. En effet, pour Ward et Dubos, le changement climatique est ressenti comme un corollaire inévitable parmi d'autres de l'essor global de l'industrialisation, de l'expansion territoriale de l'homme, de sa consommation croissante des ressources, *etc.* En retour, parce qu'à cette échelle globale, l'environnement devient une réalité finie, cet environnement global constitue un bien commun à l'humanité [Ward & Dubos, 1972].

A l'inverse, jusqu'au milieu des années 1970, cette culture est presque totalement étrangère aux scientifiques de l'atmosphère. Ceux qui travaillent sur la météorologie et la climatologie à grande échelle demeurent pour la plupart "des enfants de la Guerre froide", habitués à travailler sur des projets de conquête technologique de l'atmosphère, de maîtrise du climat et du temps, de colonisation de l'espace. L'historien Joshua Howe a consacré une trentaine de pages à l'attitude des scientifiques de l'atmosphère états-uniens (Kellogg, Johnston, McDonald, Train, Fred Singer, Carroll Wilson, *etc.*) face « à ce nouveau type de problématique environnementale » que posaient les SST, au début des années 1970 (voir Howe, 2010, pp. 79-111). Il a conclu que, quelle que fût la sous-discipline à laquelle ils appartenaient, jusqu'au milieu des années 1970 au moins (le moment où la plausibilité sur la destruction anthropique de la couche d'ozone et sur la dangerosité du changement par émissions de CO_2 commença à être moins contestée parmi les grandes figures du champ), la grande majorité des scientifiques de l'atmosphère n'étaient pas prêts à agiter le drapeau rouge de la catastrophe globale.

Ils étaient en effet peu connectés aux mouvements environnementalistes naissants. S'ils saisissaient effectivement une partie de la radicale nouveauté politique d'un problème environnemental transnational voire global – le défi de coopération internationale –, ils ignoraient souvent, et pas toujours sciemment, l'autre face – l'importance que ces questions revêtaient pour des acteurs (des "environnementalistes") qui voyaient là l'occasion de se fédérer internationalement, autour de valeurs qu'ils défendaient et pensaient universelles, et l'occasion de promouvoir des méthodes de production et de consommation, de modes d'échanges de savoirs, de denrées et de capitaux à l'échelle internationale qu'ils pensaient dans une optique de préservation de l'environnement et de sécurité alimentaire à long terme.

Ainsi, constate J. Howe, « lorsque Kellogg déclara à un journaliste du *LA Times*, début août 1970, qu'« il serait bon de s'inquiéter ('you better watch out") » des conséquences imprévisibles de modification des systèmes globaux, ceci faisait écho à un sentiment, ordinaire chez les environnementalistes, que les menaces à la nature et aux systèmes naturels devraient jouer un rôle dans les décisions au sujet des développements technologiques et économiques. Le rapport SCEP soulignait explicitement cette convergence, en cadrant sa partie sur les problèmes environnementaux globaux comme un complément des « problèmes

locaux et régionaux […] qui préoccupent profondément de nombreuses organisations qui les étudient et les améliorent » [Howe, 2010, p. 88].

Toutefois, et bien que de nombreux scientifiques de l'atmosphère états-uniens et britanniques montrèrent des sympathies pour les idées environnementalistes dès les années 1970, ils s'attelèrent encore longtemps à dissocier scrupuleusement leur travail de scientifique de celui de protecteur de l'environnement (ce qu'ils continuent de faire encore souvent, bien sûr), à l'inverse d'autres communautés de chercheurs. Et surtout, ils s'adressaient, non à « la classe moyenne », qui était pourtant la base du mouvement environnementaliste états-unien et à laquelle ils étaient pourtant plutôt affiliés sociologiquement, mais aux « bureaucrates » et « officiels » fédéraux. Finalement, juge J. Howe, c'est seulement dans les années 1980, lorsque « l'environnementalisme lui-même devint global et plus scientifique [, et à la faveur de la multiplication des problèmes atmosphériques (smog, pluies acides, changement climatique, trou de la couche d'ozone, accidents industriels de Bhopal (1984) et Tchernobyl (1986), *etc.*)], que les changements atmosphériques devinrent une inquiétude centrale des professionnels [scientifiques] de l'environnement. » Et que les scientifiques de l'atmosphère donnèrent le primat aux études sur les dangers environnementaux d'origine anthropique, y compris globales.[253] [Howe, 2010, pp. 110-111]

Le constat ne s'applique néanmoins pas à l'ensemble des scientifiques de l'atmosphère des années 1970. Dans le Sous-chapitre 5.3, nous étudions deux cas particuliers de

[253] J. Howe explique :

> "Markedly absent from scientists' appeals to international scientific elites for more money and better cooperation in atmospheric research was a concerted effort to involve the American public in their efforts to study and protect the global atmosphere. America's mainstream environmental organizations relied on a broad base of grass-roots support from the middle class in their public campaigns to influence domestic environmental policy. Scientists instead sought to gain influence among high-level bureaucrats and government officials at organizations associated with the United Nations who they hoped would sponsor extensive atmospheric research that would ultimately underpin sound environmental policies. […]
>
> "Atmospheric scientists were themselves largely a middle-class group, and many among them participated in the activities of America's environmental organizations. But as a group they actively sought to divorce their personal values from their professional opinions, and this shaped their approach to the atmospheric environment. They couched their discussions of potential threats to the global atmosphere in the equivocal language of scientific uncertainty, and their calls for action largely targeted those government officials and scientific elites who controlled the budgets and agendas of science itself.
>
> Scientists' commitments to objectivity and political neutrality continued to limit the extent of their advocacy in the early 1970s. Their cautious scientific concerns about atmospheric change failed to capture the interest of America's major environmental organizations in a significant way until the 1980s, and even then, scientists directed their appeals more toward governments and other scientists than toward the public at large. As a result, scientific concern over changes to the Earth's atmosphere and climate initiated by the SST grew into a distinct – but not altogether separate – form of environmental activism guided more by the professional values of science than by the middle-class consumer values at the heart of mainstream American environmentalism. Only as environmentalism itself became more global and more scientific did atmospheric change become a central concern of America's professional environmentalists." [Howe, 2010, pp. 110-111]

détracteurs de l'hypothèse de Johnston, et surtout de celle de Molina et Rowland : le géochimiste James Lovelock et le météorologiste Richard Scorer. Nous verrons que ce dernier avait, précisément, lutté pour que le cadrage des pollutions (autres que celles suspectées de détruire la couche d'ozone, nous l'aurons compris !) se fasse en matière de valeurs des citoyens-consommateurs, par opposition aux cadrages technocratiques.

Revenons, pour finir, aux spécialistes des pollutions de l'air. Rares sont ceux qui adhèrent voire connaissent cette culture globale au tournant des années 1970, focalisés qu'ils sont sur des pollutions locales et régionales, où il s'agit surtout d'inciter les industriels à évoluer vers des procédés moins polluants, ceci à moindre coût. Il existe toutefois des exceptions. Ainsi, le météorologiste des pollutions de l'air Richard Scorer (voir Sous-Chapitre 5.2). Mais, contrairement aux pamphlets de ce dernier, on ne trouve dans les travaux de Johnston du début des années 1970 de pensée des Limites globales. Pas que l'on n'y trouve des démonstrations de quelque compétition homme/nature, comme on les trouve par exemple dans les articles de Crutzen à partir du milieu des années 1970.

Si Johnston demeurera après 1971 un expert des pollutions aéronautiques et coopérera quelque peu au CIAP, il sera impatient de retourner rapidement à ses travaux sur les pollutions troposphériques régionales, et au travail d'élaboration de normes de qualité de l'air (1969-73 : 'California Statewide Air Pollution Research Center' ; 1971-75 : 'NAS Committee on Motor Vehicle Emissions'). Dans un long entretien donné en 1999, Johnston ne fera nulle référence aux théories des Limites, à la patrimonialisation de l'environnement global façon UNCHE, *etc.* – bref, à ce que l'on regroupe grossièrement sous le chapeau de "tournant environnementaliste" des années 1970. Il affirmera, par ailleurs, s'être rendu la conférence d'été 1970 du MIT ('the Study of Critical Environmental Problems' (SCEP), présidée par Hirschfelder) sans être très au courant des polémiques qui faisaient rage au sujet des SST, mais parce qu'il voulait « voir si [s]on champ [scientifique] pouvait être important dans les discussions » [Johnston, 2005 (1999), pp. 151 & 79-82].[254]

[254] Le récit que Johnston fait des débats du SCEP est révélateur, à la fois du fait que le chimiste était un 'outsider' qui n'escomptait pas s'éterniser dans les études atmosphériques et environnementales à grande échelle, et que certains chercheurs présents vivaient encore manifestement pleinement dans le monde de la Guerre froide (*cf.* la proposition de déplacer les populations de cinquante miles (80 km) vers le nord en cas d'impact sanitaire inhérents à la destruction de l'ozone) :

> "Hughes: Had you come to this conference with a suspicion that there was a political agenda?
> "Johnston: No. I knew there was politics involving economics and sonic boom. I reviewed last year's newspapers and January's newspapers. McDonald gave this statement of a 1 percent decrease in ozone on the average causing a 2 percent increase in skin cancer. Some of the objections to using that as an argument for not reducing ozone was, well, if everybody moved north in the northern hemisphere by about fifty miles or whatever, it would counteract this effect. The amount of skin cancer varies with latitude, so if people were worried about this, just move everybody north. Well, think about that.
> "Hughes: Was that a serious suggestion?
> "Johnston: It's been made over and over again. It sounds good in politics. All you've got to do, they say, is

Les CFC mènent les chimistes de laboratoire Molina et Rowland vers la science de la stratosphère

La conséquence de la montée du chimiste Johnston dans la stratosphère fut l'avènement de l'ère "environnementaliste" de la couche d'ozone : l'ozone stratosphérique serait dès lors *étudié en priorité en tant qu'il serait affecté par les activités humaines*. En 1971, suite à la controverse au Congrès, un organe d'expertise multidisciplinaire est créé, dont le but principal est de fournir de nouvelles estimations sur les impacts des SST. Il est nommé CIAP ('Climate Impact Assessment Program' ; 1971-75), et confié à l''US Department of Transportation' et à la NAS. Il est soutenu par l'Etat fédéral à hauteur de 21 millions de dollars.

Quelques mois plus tard, en 1972 et 1973, les émissions de composés chlorés émis par les navettes spatiales sont à leur tour suspectées de détruire la couche d'ozone, cette fois sous l'impulsion de scientifiques des atmosphères planétaires et d'aéronomes, Michael McElroy, Ralph Cicerone, Richard Stolarski et Paul Crutzen en tête (voir Chapitre 6). Après les composés azotés NO_x, le chlore devient donc un objet de recherche pour la communauté scientifique (soit dix longues années après l'hypothèse semblable de Wexler (1962), non publiée, selon laquelle les composés chlorés pourraient détruire l'ozone ; voir Chapitre 2).

L'une des contributions de Harold Johnston au CIAP consiste à préparer des tables de constantes de vitesse de réaction chimique pour les modélisateurs. Johnston raconte que, suite aux hypothèses formulées sur l'action du chlore des navettes spatiales sur la couche d'ozone, il proposa à son groupe de travail du CIAP (composé de David Garwin et de collègues du 'National Bureau of Standards', une agence gouvernementale appartenant à l''US Department of Commerce' et qui sera rebaptisée 'National Institute of Standards and Technology' en 1988) « d'inclure la chimie du chlore comme classe de réactions à tabuler, et

---

move north fifty miles and we'll be as safe as ever. Can't you just see everybody in the northern hemisphere packing up and moving north by fifty miles?

Now, let's keep the books balanced. There have been environmentalists who pictured ozone reductions as causing monsters to be generated, and ozone reduction as scorching the earth. It was not just the pro-Boeing people who said scientifically outrageous things to maintain their case; some environmentalists were equally outrageous a little later.

"Hughes: The fact that you had gone over the newspaper articles indicates that you were clued into the political ramifications of the scientific problem. But did it surprise you at this meeting that the political dimensions were so extreme?

"Johnston: Yes.

"Hughes: If you had known that it was going to be such a political affair, would you have been even more reluctant to attend this meeting?

"Johnston: I think I was reluctant because I had other scientific work I wanted to do.

"Hughes: Your reluctance to attend was not based on politics; it was based on your other scientific commitments.

"Johnston: Right. I think I would have gone anyhow. I might have been inclined to go if it looked like my field was going to be important in the discussion. I wouldn't have known quite what a hornet nest I would be getting into. So I think yes, I would have gone. I went aware of the bitterness of what the economists were saying about each other, and the sonic boom stories that had been in the headlines for a year." [Johnston, 2005 (1999), pp. 81-82]

commença à lire des travaux sur la chimie du chlore, dans l'attente d'un coup de téléphone »… Quelque temps plus tard, « des membres du bureau directeur du CIAP rapporteront [à Johnston] que [le chimiste] Sidney Benson leur avait téléphoné au début de l'année 1973, pour conseiller au CIAP d'enquêter sur le rôle du chlore dans la stratosphère. » En janvier 1974, Johnston assiste à une rencontre organisée par la NASA, à Coco Beach (Floride). Les participants s'accordent sur le constat suivant : « le chlore qu'émettraient chaque année 50 navettes spatiales serait en quantité 300 fois moins importantes que la source naturelle d'oxydes d'azote stratosphériques, et [par conséquent] son effet sur l'ozone serait probablement extrêmement faible. » [Johnston, 1992, pp. 25-26]

Mais, le chlore n'en est pas moins entré dans la partie. Or, les composés chlorés ont des origines autres que les gaz d'échappement des navettes spatiales. Des origines naturelles, mais aussi des origines industrielles. En 1972 et 1973, un chimiste, Sherwood Rowland, a assisté aux séminaires de Harold Johnston sur « l'équilibre global de l'ozone et les SST » (à Irvine, Californie, au début de l'année 1972 ; à Lake Arrowhead, Californie, au printemps 1973 ; à Irvine, de nouveau à l'automne 1973). « En décembre 1973, racontera ce dernier, Rowland [lui] téléphona pour dire que Mario Molina et lui jugeaient que les chlorofluorométhanes montant dans l'atmosphère pourraient réduire l'ozone stratosphérique de 20 à 40%. Il lui demanda s'il avait jamais entendu quiconque proposer une telle hypothèse. Johnston lui répondit : non. Molina et [Rowland] vinrent [rendre visite à Johnston] à Berkeley un ou deux jours plus tard, afin que ce dernier vît s'il ne trouvait pas quelque erreur dans leur logique ou leurs faits. [Johnston trouva] que leur ensemble de réactions pour les chlores et leurs constantes de réaction étaient incomplètes et leur donn[a] une photocopie du premier brouillon de revue des réactions du chlore, qui venait d'avoir été rédigé à la main par Robert Watson, alors post-doc travaillant avec [lui] sur le projet CIAP. [… Johnston ne trouva par ailleurs] aucune erreur de logique dans le raisonnement [de Rowland et Molina] », qui allait comme suit :

« 1. Les mesures de CFC atmosphériques de Lovelock et d'autres.[255]

[255] Depuis 1970, Lovelock faisait état de l'augmentation drastique des émissions industrielles de chlorofluorocarbones dans l'atmosphère. Elles étaient très vraisemblablement dues à la production en hausse exponentielle de solvants d'expulsion dans les bombes aérosols au cours des dernières décennies. Lovelock ne faisait état d'aucune inquiétude environnementale particulière, mais soulignait que, visiblement, les CFC n'interagissaient pas chimiquement dans la basse atmosphère, et qu'il n'y existait par ailleurs aucun autre puits à CFC, et que les CFC étaient peu lessivés par les précipitations. Les CFC semblaient étaient donc destinés à transiter vers la stratosphère, où il semblait en revanche exister des puits pour les composés chlorés. La publication de Lovelock la plus souvent citée est celle du 19 janvier 1973 dans *Nature*, mais Lovelock avait communiqué ses "découvertes" dès 1970.

James Lovelock avait détecté des CFC en quantité significative dans l'atmosphère sur l'ensemble du globe, à l'aide d'instruments de mesure atmosphérique nouveaux qu'il avait lui-même développés. Lovelock affectionnait l'aspect instrumental du travail de scientifique. Il avait d'abord développé un anémomètre à ionisation. Cet instrument détectait des phénomènes d'ionisation gazeuse comme témoins de la présence d'un gaz, donc d'une espèce chimique. A la fin des années 1960, alors qu'il travaille pour la NASA, Lovelock utilise le successeur de cet instrument, le

« 2. Le taux de production [important] de CFC par l'industrie chimique.

« 3. Les données spectroscopiques et chimiques mesurées en laboratoire, et compilées avec un œil critique dans des tables.

« 4. Leurs calculs informatiques, qui utilisaient un modèle de diffusion turbulente ('eddy diffusion') à une dimension pour trouver l'altitude à laquelle les CFC seraient décomposés par les rayons UV.

« 5. La comparaison du système CFC/chlore avec le notablement semblable ('strikingly similar') système N_2O/NO_x, pour lequel le CIAP avait fourni de récentes vérifications expérimentales. » [Johnston, 1992, pp. 27-28]

Cette démonstration sera reproduite dans un article envoyé en janvier 1974 à *Nature*. Il sera publié en juin suivant, sous le titre de "Stratospheric sink for chlorofluoromethanes: chlorine atom – catalyzed destruction of ozone" (Molina & Rowland, 1974). Il justifiera le Prix Nobel de Chimie que recevront M. Rowland et S. Molina en 1995 (en compagnie de Crutzen) – même si, pour Molina, il y aura aussi son travail sur le dimère de chlore dans la chimie du trou de la couche d'ozone (voir McGrath *et al.*, 1988).

Comme pour Johnston, la formation de chimiste de Rowland et Molina peut expliquer la hâte qu'ils montrèrent à conclure à une destruction possible d'ozone stratosphérique, là où beaucoup d'aéronomes étaient alors moins prompts à admettre la vulnérabilité du grand monstre géologique qu'est la couche d'ozone – alors qu'ils connaissaient, eux aussi, les travaux récents sur la diffusion des composés chlorés vers la stratosphère, en particulier ceux de James Lovelock communiqués depuis 1970.

Ce n'étaient pourtant pas des études sur la pollution de l'air, ni sur quelque autre problématique atmosphérique, qui avaient mené Rowland et son jeune collègue à devenir « assez familiers » avec les « systèmes CFC/Cl_x et oxide nitreux/NO_x » (ainsi en jugea Johnston lorsqu'il les rencontra), mais des études de chimistes qui étaient étrangères à l'atmosphère [Johnston, 1992, p. 27]. Né à Mexico, Mario Molina y avait obtenu un diplôme de premier cycle en ingénierie chimique, puis avait étudié les mathématiques et les sciences en Europe (en Allemagne, en France), avant d'émigrer aux Etats-Unis. Il avait soutenu sa thèse à Berkeley, en 1972, comme chimiste des lasers ('laser chemist'), puis avait rejoint à Irvine l'équipe de Rowland comme post-doctorant, à l'automne 1973.

Au cours de son allocution comme Prix Nobel de Chimie, en 1995, Mario Molina racontera ainsi l'heureuse intuition qui l'avait conduit à choisir les CFC comme objet de recherche :

---

détecteur à capture d'électrons, qu'il avait développé une décennie plus tôt, pour établir la distribution globale des halocarbones, dont les CFC.

« Sherry [(Sherwood Rowland)] était un pionnier de la recherche sur la chimie de « l'atome chaud »,[256] qui étudiait les propriétés chimiques d'atomes avec une énergie de translation excédentaire ('with excess translational energy') et produits par des procédés radioactifs. Sherry me proposa une liste d'options de recherche : le projet qui m'intrigua le plus consistait à découvrir le destin environnemental de certains produits chimiques industriels très inertes – les chlorofluorocarbones (CFC) – qui s'étaient accumulés dans l'atmosphère et dont on pensait à l'époque qu'ils n'avaient pas d'effets significatifs sur l'environnement. Ce projet m'offrait une opportunité de découvrir un nouveau champ – la chimie atmosphérique –, au sujet duquel j'ignorais presque tout [...]. Les CFC sont des composés semblables à d'autres que Sherry et moi avions étudiés du point de vue de la dynamique moléculaire : nous étions familiers de leurs propriétés chimiques, mais pas de leur chimie atmosphérique. » [Molina, 1995]

La « chimie des atomes chauds » était alors à son apogée (elle deviendra plus marginale à partir du milieu des années 1970, ses spécialistes intégrant pour certains la communauté de l'imagerie médicale, qui avait imaginé des technologies prometteuses basées sur des principes semblables à la chimie des atomes chauds).

En 1948, Sherwood Rowland avait rejoint le Département de Chimie de l'Université de Chicago. Il se destinait à une carrière de chimiste des atomes radioactifs. Sous la direction de Willard Libby, qui obtiendra en 1960 un Prix Nobel pour avoir développé « la technique de datation au Carbon 14 », Rowland soutient sa thèse de doctorat ès radiochimie en 1952 (Titre : "On the chemical state of cyclotron-produced radioactive bromine atoms"). Douze ans plus tard, il rejoint l'Université d'Irvine pour un poste de conférencier en chimie et de premier président du Département de chimie. Bien que Rowland eût soutenu sa thèse sur un sujet sans lien direct avec l'atmosphère, puis se fût consacré pendant deux décennies principalement à la chimie des atomes chauds, il avait fait, au cours de la décennie 1950, plusieurs rencontres avec les sciences de l'atmosphère. Ceci, dès ses études à Chicago, où il avait été initié notamment par des figures prestigieuses des sciences des atmosphères globales, dont le chimiste Harold Urey et le non moins renommé physicien Edward Teller, le Père de la Bombe H, qui en était venu à s'intéresser à l'atmosphère par le biais des essais nucléaires atmosphériques.[257] Mais, c'est seulement en 1972, à la faveur de la lecture d'une

[256] La chimie des atomes chauds est l'étude des réactions chimiques qui adviennent entre des atomes et ions de haute énergie et (habituellement) des atomes, molécules, ions et radicaux à un niveau énergétique thermique. Il s'agit de réactions consécutives à des transformations nucléaires ou photochimiques.

[257] Plus de quarante ans plus tard, dans son discours du Nobel, Rowland racontera :

> "The first nuclear reactor had been built by Enrico Fermi in 1942 under the football stands at the University of Chicago, and the post-war university had managed to capture many of the leading scientists from the Manhattan Project into the Physics and Chemistry departments. My impression at the time (and

communication sur les travaux de James Lovelock sur les CFC, racontera Rowland, que sa "reconversion" en scientifique de l'atmosphère fut effective.[258]

A partir de son arrivée à l'université de Chicago, en 1948, l'AEC ('Atomic Energy Commission Energy'), puis ses avatars la 'Research and Development Administration' et le 'Department of Energy', financèrent de nombreuses recherches de S ; Rowland, le dernier contrat de l'AEC arrivant à son terme seulement en 1994, époque où la NASA assurait déjà la presque totalité du financement des travaux du chimiste. Au début de l'automne 1973, ce sont précisément ces financements de l'AEC qui permirent au post-doctorant de Rowland, Mario Molina, de se pencher à plein temps sur le devenir des CFC dans l'atmosphère. Or, affirmera Sherwood Rowland dans son autobiographie à l'attention du comité Nobel,

> « Au bout de trois mois [de travail], Mario [Molina] et [lui] réalisèrent qu'ils n'étaient pas en présence d'une question uniquement scientifique […], mais potentiellement d'un grave problème environnemental impliquant une destruction substantielle de la couche d'ozone stratosphérique [; car, puisque les CFC n'étaient pas détruits dans la troposphère, ils devaient selon toute vraisemblance atteindre la stratosphère où ils pourraient interagir chimiquement]. » [Rowland, 1995]

Les carrières de Molina et Rowland venaient de basculer.

---

now in retrospect 45 years later) was that this was an unbelievably exciting time in the physical sciences at the University of Chicago. My physical chemistry course was taught by Harold Urey for two quarters and in the third quarter by Edward Teller; inorganic chemistry was given by Henry Taube; radiochemistry by Libby. I also attended courses on Nuclear Physics given by Maria Goeppert Mayer and by Fermi. (The chemistry student grapevine said, "Go to any lecture that Fermi gives on any subject"). Urey and Fermi already had been awarded Nobel Prizes, and Libby, Mayer and Taube were to receive theirs in the future." [Rowland, 1995]

[258] Rowland relatera :

> "I was invited to the second of these workshops in January, 1972, in Fort Lauderdale, Florida, where I heard a presentation about recent measurements by the English scientist, Jim Lovelock, of the atmospheric concentrations of a trace species, the man-made chlorofluorocarbon CCl^3F, on the cruise of the *Shackleton* to Antarctica. His shipboard observations showed its presence in both the northern and southern hemispheres, although in quite low concentration. One of the special advantages cited for this molecule was that it would be an excellent tracer for air mass movements because its chemical inertness would prevent its early removal from the atmosphere.
>
> "As a chemical kineticist and photochemist, I knew that such a molecule could not remain inert in the atmosphere forever, if only because solar photochemistry at high altitudes would break it down. However, many other possible chemical fates could be imagined, and I wondered whether any of these might occur. In early 1973, my regular yearly proposal was submitted to the A.E.C. and was duly approved and funded by them. In addition to the continuation of several radiochemistry experiments, I also included in the proposal a new direction - asking the question: what would eventually happen to the chlorofluorocarbon compounds in the atmosphere?" [Rowland, 1995]

Chapitre 5. Les opposants aux réglementations des CFC

Les retombées médiatiques de l'article de Rowland et Molina, à l'automne 1974, sont importantes. Et, la réponse des 'National Academies' des Etats-Unis, immédiate : une étude 'ad hoc' est mise sur pied dès octobre 1974, et le Président de la NAS Philip Handler ordonne la formation d'un panel d'experts en complément du CIAP. Le Congrès s'affaire également : en décembre, la Chambre des Représentants tient ses premières auditions de scientifiques, afin de jauger les forces en présence et estimer l'urgence de la situation. Suit un bras de fer médiatique et scientifique, où des experts parlent au nom des industriels, des universités, de leur communauté disciplinaire, des agences fédérales, du MIT, de la société civile, *etc.* La controverse fait rage dans les arènes scientifiques, politiques et médiatiques états-uniennes trois années durant, entre le moment de la diffusion des résultats de Rowland et Molina, au milieu de l'année 1974, et les premières réglementations de CFC aux Etats-Unis en 1978, qui s'incarnent sous la forme d'un amendement de l''US Clean Air Act'. Lorsqu'il entre en vigueur en 1978, il interdit la vente sur le sol états-unien des produits contenant des CFC dans les secteurs de l'alimentation, des médicaments, des appareils ménagers et des produits cosmétiques (à l'exception des inhalateurs doseurs) (le 15 mars), puis l'arrêt de toute production manufacturée de propulseurs aérosols aux CFC dans le pays (le 15 décembre) [Andersen & Sarma, 2002, p. 376]. Mais, cet amendement du 'Clean Air Act' est loin de réglementer l'ensemble des substances potentiellement destructrices d'ozone connues.

Si ce texte de 1978 ne met pas un terme définitif à la controverse, il la fait entrer dans une nouvelle phase 1978-85, peu médiatisée, qui se joue principalement dans les arènes internationales et avec un certain apaisement du côté de l'industrie des CFC. Mais, les réglementations de 1978 avaient été acquises de haute lutte par l'EPA et la NAS, et l'industrie continuera à en contester la légitimité scientifique dans les mois qui suivront leur mise œuvre. Et pour cause : entre 1974 et 1978, aucun résultat empirique de mesure *in situ* n'est venu corroborer l'hypothèse de Molina-Rowland. De plus, la théorie chimique de l'ozone stratosphérique n'est nullement "stabilisée". Dans la seconde moitié des années 1970, la théorie d'une destruction anthropique de l'ozone par les gaz d'échappement des SST et l'hypothèse de Rowland et Molina sont loin de faire l'unanimité au sein de la communauté scientifique, y compris au sein de la recherche publique.

En Europe, où se concentrent encore la plupart des scientifiques qui peuvent se vanter d'être spécialisés dans l'étude de la physico-chimie de la couche d'ozone (Marcel Nicolet,

David Bates, Gordon Dobson (qui décède en 1976)), les esprits sont apaisés. Ainsi, entre 1974 et 1977, l'aéronome belge M. Nicolet réunit presque en toute quiétude la bibliographie nécessaire à la rédaction du rapport que lui a commandé le Comité français d'études sur les conséquences des vols stratosphériques (COVOS ; 1972-76). Achevé en 1977, le rapport de Nicolet expose un état de l'art « des réactions chimiques de l'ozone dans la stratosphère » de plus de cinq cents pages. L'ouvrage intègre, en plus des réactions chimiques susceptibles de se produire comme conséquences des vols stratosphériques, les réactions pouvant résulter de la contamination de la stratosphère par les CFC. Mais, Nicolet s'interdit toute conjecture au sujet du devenir de la couche d'ozone. Le « Professeur de Géophysique Externe à l'Université Libre de Bruxelles » présente les travaux des Molina, Rowland, Cicerone, McElroy, Crutzen, Stolarski, Wofsy, Sze, Walter et Stedman, publiés en 1974 et 1975, comme un « problème posé » sur l'action des « composés halogénés » (et en particulier : chlorés), tout comme « on a[vait] vu [en 1950] le problème posé par les composés hydrogénés [et] en 1970 celui dû aux composés azotés » [Nicolet, 1978, pp. 7, 3, 427 & 9].[259]

> Les universitaires européens qui voudront guerroyer autour de l'hypothèse de Molina-Rowland devront traverser l'Atlantique. Car, à l'inverse de l'Europe, aux Etats-Unis, où une controverse autour d'une probable destruction anthropique de l'ozone a déjà eu lieu, les esprits sont échauffés. Les experts scientifiques réunis par la NAS apportent leur soutien à la théorie de Molina-Rowland. Ils sont épaulés par des scientifiques de la NASA et de la NOAA. Et, certains administrateurs de l'EPA et membres du Congrès états-unien plaident rapidement, avec gravité, l'obligation morale de réglementer rapidement les CFC afin de protéger la couche d'ozone, au nom d'un principe de précaution. En outre, Paul Crutzen, qui a donné sa bénédiction

[259] Précisons par ailleurs que, dans la lignée de l'alerte de Molina-Rowland, certains scientifiques poseront leur regard sur des fluorocarbures autres que les CFC. En particulier, une famille de produits chimiques proches cousins des CFC : les halons (ou bromofluorocarbures). Développés dans les années 1950 par l'armée américaine pour rentrer dans la production d'un nouveau type d'extincteurs (pour combattre les incendies dans les véhicules blindés), deux types de halon furent commercialisés dans les années 1960 : le Halon 1301 (CF_3Br), dont la toxicité était faible et pouvait être utilisée pour asperger des espaces clos comme des salles informatiques, des chambres fortes, plateformes de forage pétrolier et des centraux téléphoniques, et dont la production augmenta rapidement au cours des décennies 1960-70 ; le Halon 1211 (CF_2BrCl), qui était légèrement plus toxique mais dont l'usage se répandit rapidement dans les extincteurs portatifs au cours de la décennie 1970.

D'autres scientifiques s'intéresseront à d'autres menaces potentielles venues des activités humaines : les engrais azotés, dont l'utilisation générait des émissions d'oxydes d'azote dans l'atmosphère (comme le faisaient les SST) ; le méthane, émis par les matières végétales en décomposition et les troupeaux d'élevage (le méthane réagit chimiquement avec des atomes individuels d'oxygène, réduisant ainsi le nombre d'atomes d'oxygène libre disponible pour former de l'ozone) ; le méthylchloroforme, que l'on retrouve dans des solvants de dégraissage utilisés en grande quantité par l'industrie ; le tétrachlorure de carbone ; le brome (le méthylbromure, qui entre dans la composition de nombreux produits chimiques, verra sa production augmenter de 400 pourcent entre 1972 et 1984, alors que le bromure organique était émis en quantité importante car il entrait dans la composition du dibromure d'éthylène, utilisé comme additif dans l'essence au plomb et comme fumigateur dans les produits agricoles. [Parson, 2003, p. 22 ; Morone & Woodhouse, 1986, pp. 85-87]

Pour notre part, nous nous en tiendrons ici aux débats, de loin les plus médiatisés, sur les CFC, seuls produits réglementés dans les années 1970 pour son action possible sur la couche d'ozone.

aux travaux de H. Johnston quelques mois après leur publication, rejoint le campus de Boulder à l'été 1974. Rondement, il prend fait et cause pour l'hypothèse de Molina et Rowland (qui ont cité Crutzen, 1971 dans leur article publié dans *Science* le 28 juin 1974 [Molina & Rowland, 1974, p. 812]).

Les discours catastrophistes de certains et la précipitation montrée à légiférer attirent l'ire des industriels. Au début des années 1970, des millions de tonnes de composés chlorés dits CFC sont produits chaque année dans le monde, utilisés en majorité dans les bombes aérosols, les climatiseurs et les réfrigérateurs. Aux Etats-Unis, principal pays producteur et consommateur de CFC, les enjeux économiques sont colossaux. Sans surprise, la majorité des contre-experts à l'expertise du CIAP sont des scientifiques travaillant au sein des laboratoires de l'industrie des CFC. Les passes d'armes entre industrie des CFC, DuPont de Nemours en tête, d'une part, et les experts de la NAS et les lanceurs d'alerte Molina et Rowland, d'autre part, sont régulièrement mises en scène par les médias américains entre la fin de l'année 1974 et 1978.

De plus, le zèle de certains scientifiques universitaires, d'élus et de groupements de la société civile fait également grincer des dents parmi les chercheurs de la recherche publique. Ils ont été échaudés par la récurrence des alertes à la destruction anthropique de la couche d'ozone formulées depuis 1970, qu'ils jugent fantaisistes. Au premier rang de cette cohorte d'opposants, on remarque la présence de scientifiques de l'atmosphère et des géophysiciens européens. Parmi eux, deux Britanniques, qui décident de se rendre "là ou ça se passe", aux Etats-Unis. D'une part, James Ephraim Lovelock (1919-… ; alors "simple" Professeur associé à la 'Reading University' en Angleterre). Lovelock, qui a été financé pendant quelques mois par DuPont au début des années 1970 pour continuer ses travaux sur l'accumulation des CFC dans l'atmosphère (sans lien alors avec la destruction de l'ozone), se rend ainsi plusieurs fois aux Etats-Unis en 1974-75 pour croiser le fer. D'autre part, des scientifiques de l'atmosphère plus attachés à l'université que ne l'est J. Lovelock capteront des financements de l'industrie chimique : J.N. Pitts et J.A. Taylor (University of California) ; C. Sandorfy (University of Montreal) ; R.A. Rasmussen (Washington State University) ; et, donc, un second Anglais : le météorologiste et Professeur de mécanique théorique à l'Imperial College, Richard Segar Scorer (1919-2011), qui se fera quant à lui financer une brève « tournée américaine » médiatique par la 'Chemical Specialties Manufacturer's Association', au début de l'année 1975. [Andersen & Sarma, 2002, p. 459]

« Tournée américaine ('U.S. tour') » est en tout cas l'expression qu'utilisent les historiens états-uniens Naomi Oreskes et Erik Conway dans leur ouvrage *Merchants of Doubt* (2010) afin de tourner Scorer en ridicule [Oreskes & Conway, 2010, p. 114]… A l'image de certains de leurs prédécesseurs, tels que Lydia Dotto et Harold Schiff (Dotto & Schiff, 1978), Oreskes et Conway ont opté pour un cadrage plutôt manichéen de la controverse de l'ozone des années 1970, opposant la *neutre* expertise officielle, principalement publique, qui convergerait prétendument vers un consensus suffisant, à une expertise *pro-industrielle* défendant les intérêts économiques des industries, que la perspective de réglementations menace (*cf.* Oreskes & Conway, 2010, chapitre 4).[260] L'expression « guerre de l'ozone » qu'utilisent ces quatre auteurs ne trahit-il pas leur cadrage binaire de la controverse ? Si ce schéma dichotomique n'est, certes, pas stérile de tout enseignement (nous l'avons nous-même privilégié dans le chapitre précédent au sujet des SST), nous tentons à présent de le dépasser dans l'étude de cas des CFC, que nous analysons plus en détail.

Premièrement, la controverse scientifique ne saurait être réduite à une opposition simple entre science publique et science privée. Elle est également structurée par les lieux de production scientifique (Europe *vs* Etats-Unis, principalement), et par les appartenances disciplinaires. Dans le Chapitre 4, nous avons souligné l'apport décisif de chimistes (de laboratoire et de la troposphère), dans l'élaboration d'hypothèses alarmistes sur la destruction anthropique de l'ozone par les SST et les CFC. Or, s'ils étaient plutôt absents des débats au cours des années 1970-71 (à l'exception peut-être de Conway Leovy, qui a témoigné devant le Congrès, mais dont l'influence dans la controverse semble avoir été très limitée), les aéronomes intègrent petit à petit les débats par la suite (à commencer par Paul Crutzen, qui soutient l'hypothèse de Harrison dès la fin de l'année 1971 (*cf.* Crutzen,

[260] Dans leur ouvrage *Marchands de doutes*, Oreskes et Conway passent hélas trop rapidement sur les controverses de l'ozone aux Etats-Unis dans les années 1970 [Oreskes & Conway, 1989, pp. 107-118]. Aussi, avons-nous plutôt utilisé le récit autobiographique de Harold Johnston (Johnston, 1992), et les travaux de l'historien Edward Parson (Parson, 2003, pp. 31-43) et de la sociologue Karen Litfin (Litfin, 1994)… Bien que, ce qui constitue une limite à leur emploi, ces deux derniers travaux empruntent de nombreux évènements consignés dans l'ouvrage *the Ozone War* (Dotto & Schiff, 1978), fruit de la collaboration de la journaliste scientifique Lydia Dotto et du chimiste Harold Schiff (Université de York, Toronto)… Or, ce dernier, fut directement impliqué dans le programme CIAP (1971-75), puis fut le président du Panel d'experts sur la chimie stratosphérique et le transport atmosphérique de la *NAS*, qui publia en 1979 un rapport sous le titre *Stratospheric ozone depletion by halocarbones : chemistry and transport*. Le récit de Dotto & Schiff, 1978 doit donc être lu à l'aune de cette activité d''insider' de Harold Schiff.

Par ailleurs, par contraste avec la plupart des analystes de la controverse, nous nous sommes abstenus de reproduire les évènements que la journaliste Sharon Roan relate dans les Chapitres 1-5 de son *Ozone Crisis. The 15 Year Evolution of a sudden Global Emergency* (Roan, 1989). En effet, elle y propose une lecture critique, à la fois de la construction, dans l'urgence, de preuves d'une possible destruction de la couche d'ozone par les CFC, dans les premières années qui suivent la publication de l'article de Rowland et Molina (le 28 juin 1974), et de la fin de non recevoir des grandes industries des CFC, bien décidées à ne faire aucune concession ; mais, hélas, son travail est trop pauvrement référencé pour que nous puissions en extraire ne serait-ce que des éléments d'analyse [Roan, 1989, pp. 1-86]. (Lorsque nous citerons cet ouvrage, à une ou deux reprises, nous le ferons "pour l'anecdote", en mettant le lecteur en garde.)

1971)). En outre, des coopérations transdisciplinaires se développent autour de la destruction anthropique de l'ozone, notamment au sein du CIAP entre 1971 et 1975, puis au sein du Programme sur la haute atmosphère de la NASA à partir de 1976 (voir Chapitre 6). Toutefois, s'il est vrai que la controverse SST a créé une nouvelle opportunité de coopération entre plusieurs sous-disciplines des sciences de l'atmosphère, elle a également procuré dans le même temps « la première opportunité majeure pour les chimistes de l'atmosphère et les météorologistes de croiser le fer », comme le formulait la sociologue Karen Litfin en 1994 (en ajoutant que « le conflit s'était depuis apaisé, mais qu'il était encore manifeste au lendemain de la découverte du trou de l'ozone antarctique en 1985 ») [Litfin, 1994, chapter 3, pp. 7-8 of 18]. Les météorologistes *et* les géochimistes, ajoutons-nous. Nous prendrons pour exemple R. Scorer et J. Lovelock, respectivement.

Deuxièmement, on ne saurait non plus classer tous les opposants aux réglementations des CFC des années 1970 dans la catégorie de ceux qui entendent prendre le rebours du "tournant environnementaliste" en cours. Comme nous le verrons, Scorer est loin d'être un "anti-environnementaliste" ; il défend simplement une modalité de protection environnementale différente de la plupart de ses collègues. Ses lectures de la littérature de sciences humaines et sociales lui permettent de combiner un "environnementalisme" *et* une critique de l'expertise, de l'obsession du "plus de science", de la technologisation des problèmes de sociétés (dont les problèmes environnementaux), *etc.* A l'inverse de Lovelock, par exemple, Scorer ne se limite pas à mettre en doute la nécessité des réglementations des CFC, mais délivre de virulents réquisitoires contre le type particulier d'expertise et de gouvernance environnementale qui s'imposent dans les années 1970. Sur le long terme, le programme politique qu'expose Scorer entre en fait beaucoup plus radicalement en conflit avec les intérêts des industriels que les simples réglementations préconisées par Molina, Rowland, Johnston, le CIAP, l'EPA. Les prolégomènes à la réflexion de Scorer sont notamment à trouver dans les grands récits des Limites planétaires, qui peignent le visage d'un monde devenu « plein » (du fait de la croissance économique globalisée, de modes de vie et de consommation dominants, de l'augmentation spectaculaire de la population mondiale, *etc.*), métaphore extrêmement populaire dans les années 1970… mais que peu de scientifiques de l'atmosphère reprennent à leur compte. Car, comme nous l'avons montré dans le chapitre précédent en dialoguant avec le travail de thèse de Joshua Howe, *Making Global Warming green. Climate Change and American Environmentalism, 1957-1992*, dans les années 1970, même les experts scientifiques qui prennent au sérieux les risques d'atteinte anthropique à l'atmosphère à grande échelle (destruction d'ozone, changement climatique, pluies acides) jettent très rarement des passerelles avec les mouvements environnementalistes en gestation (et désireux de s'internationaliser). Ils privilégient un

cadrage très technique, où le problème pourrait se résoudre en négociant avec les industriels, secteur par secteur [Howe, 2010, pp. 79-111].

Notre présent chapitre analyse les discours et stratégies des opposants aux réglementations des CFC, entre 1974 et 1978. Il se veut un complément des études que nous venons de mentionner, qui sont soit étrangères à la méthodologie des sciences humaines, soit focalisées sur les aspects gouvernance. Nous examinons les *stratégies médiatiques et la production de savoirs scientifiques* des acteurs scientifiques qui cherchèrent à contrer le discours d'urgence à réglementer les CFC que tinrent Rowland, Molina, et les experts de la recherche publique (ceux réunis par la NAS, en particulier), entre 1974 et 1976. Nous ne cherchons pas ici à périodiser la controverse.[261] Au contraire : en première approximation, nous traitons ici les discours des industriels, et des scientifiques qui défendent l'hypothèse de Molina et Rowland, comme relevant d'une logique constante sur toute la période traitée (entre le milieu de l'année 1974 et la fin de l'année 1976).

Dans le Sous-chapitre 5.1, nous nous focalisons sur un premier type de voix dissidentes : celle des industriels des CFC. Le Sous-chapitre se déploie en deux temps. Dans un second temps, il montre que l'industrie chimique des CFC multiplia les tentatives de "décrébilisation" de l'expertise officielle (les modèles de Molina et Rowland, et l'expertise du CIAP orchestrée par la NAS) dans l'arène médiatique. La principale stratégie de l'industrie consista à isoler artificiellement les lanceurs d'alerte Molina et Rowland, pour mieux condamner leur prétendu "double langage" (selon qu'ils s'exprimaient dans l'arène scientifique ou dans l'arène politique devant les commissions fédérales). Certaines de ces industries, au premier rang desquelles se trouvait DuPont, étaient très puissantes, et étaient regroupées en divers consortia ('Manufacturing Chemists Association', 'Chemical Specialties Manufacturers Association'), qui plaidaient leur cause dans les médias.

Dans un second temps, nous montrons que, si la critique de l'expertise officielle par les industriels s'opéra principalement par voie de presse, c'est en partie parce que les contre-experts de l'industrie étaient novices dans la science de l'ozone stratosphérique. Le processus accéléré d'expertise de la NAS, de l'IMOS ('Interagency Task Force on Inadvertent Modification of the Stratosphere' ; Ford/NAS/… ; début 1975) et du CIAP ('Climate Impact

[261] Pour une approche diachronique, qui identifie certains évènements comme des basculements du rapport de force au sein de la controverse, le lecteur se reportera à Dotto & Schiff, 1978 ou à Parson, 2003. Parson cherche ainsi à discriminer différentes phases de la controverse en fonction des « annonces des nouvelles découvertes scientifiques ». Il écrit :

> "Perhaps because most participants in the debate tried to ground their policy arguments in scientific claims, movements in the public and political debate followed the direction of announcements of new scientific findings. New findings swung consistently against CFCs through 1975, turned in their favor for a few months in early 1976, then reversed again by the late summer of 1976 as further findings appeared to increase the likely risk." [Parson, 2003, p. 37]

Assessment Program' ; NAS/Department of Transportation ; 1971-75), entre 1974 et 1976, prit de vitesse une science aéronomique des DuPont et alliés qui en n'était qu'à ses balbutiements. Suite aux communications de James Lovelock sur l'accumulation des CFC dans l'atmosphère au tournant des années 1970, les chercheurs de l'industrie avaient opté pour un programme de recherche sur les impacts des CFC *dans la troposphère*. Après la publication de l'article de Molina et Rowland en juin 1974, ils ajoutèrent rapidement un volet stratosphérique à leur programme de recherche (dès septembre 1974). Mais, ce fut trop peu trop tard. Faute de structures et de chercheurs adaptés à la recherche stratosphérique au sein des laboratoires industriels, l'argent débloqué par la 'Chemical Specialties Maunufacturers Association' et la 'Manufacturing Chemists Association' alla même en grande partie aux scientifiques universitaires, affirmera Harold Schiff, l'un des participants à l'expertise scientifique publique menée par la NAS [Parson, 2003, p. 32 ; Dotto & Schiff, 1978, pp. 149-150]. La position de DuPont se raidit en 1975… ne faisant que renforcer l'impression d'une industrie sur la défensive, cherchant à protéger coûte que coûte ses affaires. Dans le même temps, l'EPA et les élus semblaient avoir fait leur choix : réglementer. En outre, s'il est difficile de dire si la campagne de dénigrement que les industriels ont menée dans les médias a desservi leur cause, cette campagne eut sans nul doute pour effet de renforcer la solidarité des scientifiques entre eux, notamment autour de Molina et Rowland, qui subissaient les foudres de DuPont et leurs homologues producteurs de CFC. Dès 1976, l'interdiction prochaine de produits contenant des CFC ne faisait guère de doute. Toutefois, comme nous le montrons dans notre dernier Sous-chapitre (5.4), les réglementations de 1978 ne furent toutefois pas des plus ambitieuses. L'industrie états-unienne fut efficace dans ses chantages sociaux (licenciements, délocalisation, crise économique nationale encore accrue), et minora en outre sa capacité de développement d'alternatives aux CFC. Les pays européens gros producteurs de CFC, de surcroît, ne montraient encore nulle volition de légiférer sur ce problème "global".

Dans le Sous-chapitre 5.2, nous étudions les critiques du géochimiste James Lovelock et du météorologiste Richard Scorer, deux 'outsiders' de la controverse issus de la recherche publique ('outsiders', car ils ne sont ni des aéronomes, ni des chimistes de l'atmosphère ; aucun ne collabore au CIAP ni à aucun autre groupe d'expertise sur la destruction anthropique de l'ozone ; enfin, Lovelock et Scorer sont anglais, et ne sont pas implantés aux Etats-Unis).

Dans le Sous-chapitre 5.3, nous nous attardons sur la critique de la gestion environnementale – dont l'expertise environnementale – que réalise Scorer. Notre intention première n'est pas de réhabiliter le Britannique, qui a été depuis 1975 maintes fois désigné à tort comme participant d'un anti-environnementalisme, sous prétexte qu'il s'était opposé de

manière virulente à l'hypothèse Molina-Rowland. Si nous avons décidé de redonner la parole à ce "perdant de l'histoire", c'est par devoir de vérité, de complexité et d'historicité : il exista bel et bien une certaine diversité (visible) parmi les opposants à l'expertise alarmiste sur la destruction anthropique de l'ozone dans les années 1970. En outre, la critique de Scorer se trouve à la rencontre des sciences de la nature et des sciences humaine et sociales (histoire des sciences, science politique et économie) : il appelle à s'interroger sur l'émergence d'un nouveau régime des sciences dans les années 1970 (et, plus généralement, sur les limites de confier le destin de l'homme aux sciences, aux modèles numériques), sur la capacité de l'homme à gérer la planète tout en augmentant toujours son emprise sur elle, sur la "technologisation" et la compartimentation des problèmes de société (que Scorer entreprend de placer au cœur de son discours de politique générale, avec sa critique des inégalités sociales, de la société de consommation, de la croissance économique dans un monde globalisé, *etc.*). Scorer s'attaque en effet à la technicité croissante des politiques environnementales et au "technological fix" de son époque, et tente de réinscrire la problématique des pollutions dans un projet politique plus durable et plus mondial, qui repenserait les modes de consommation et le dogme économique occidental (libéral).

Dans un dernier sous-chapitre, enfin, nous soupesons les différents facteurs qui ont concouru à clore, en 1978, la première controverse sur les CFC… "armistice" qui allait tenir jusqu'en 1985.

5.1. La riposte de l'Industrie

Introduction : la mobilisation de la recherche publique et de l'industrie des CFC suite à l'alerte de Molina et Rowland

L'Industrie états-unienne des bombes aérosols riposte très rapidement à l'irruption médiatique de l'alerte de Molina et Rowland en septembre 1974.[262] Déjà organisée en deux associations professionnelles, la 'Chemical Specialties Maunufacturers Association' et la 'Manufacturing Chemists Association' (aujourd'hui CMA, 'Chemical Manufacturers Association'), l'Industrie chimique répond tout d'abord par un chèque de 3 à 5 millions de dollars à la recherche scientifique. De plus, des fonds ont auparavant été débloqués par la

[262] Même si elle ne pénétra l'arène médiatique qu'en septembre 1974, suite à une conférence de presse des deux chimistes, l'hypothèse de Rowland et Molina était connue des industriels six mois environ avant la publication de leur article en juin 1974, affirme l'historien Edward Parson :

> "Recognizing the grave significance of their results, Molina and Rowland waited for the paper to appear before discussing it publicly. During the six-month wait, a few rumors and unauthorized reports circulated, encouraging DuPont officials to shift the emphasis of their CFC environmental research to include preliminary studies of the stratosphere." [Parson, 2003, p. 31]

'Manufacturing Chemists Association', dès 1972, peu après les mesures de CFC dans l'atmosphère par Lovelock, afin de financer un 'Fluorocarbon Program Panel' (FPP). En outre, un autre groupe de travail public/privé nommé 'Inadvertent Modification of the Stratosphere' (IMOS) voit le jour en janvier 1975, sous l'impulsion de l'administration Ford. Or, les marchés aéronautiques et spatiaux de Ford risquent d'être larvés, non seulement par la limitation de la construction de SST civils, mais aussi éventuellement de navettes spatiales, qui émettent du chlore dans la moyenne atmosphère. En définitive, les travaux d'IMOS porteront sur l'impact des chlores, qu'ils soient d'origine aérospatiale ou inhérents à la consommation de produits libérant des CFC dans l'atmosphère. Enfin, non sans rappeler la stratégie éprouvée des industries du tabac, des organismes de relations publiques sont créés pour défendre les produits contenant des CFC dans la sphère publique : 'the Aerosol Education Bureau' ; 'the Council on Atmospheric Sciences' ; 'the Western Aerosol Information Bureau'. [Dotto & Schiff, 1978, pp. 149-150 ; Litfin, 1994, chapter 3, p. 9][263]

Les membres de la communauté scientifique universitaire dont ont émané l'alerte, ou qui l'ont relayée, se trouvent doublement bravés par les industriels, qui leur lancent un défi scientifique et médiatique. Cependant, en juin 1975, l'industrie des CFC subit un cuisant revers, lorsque le panel public/privé de l'IMOS déclare que les CFC doivent être réglementés au plus vite, dans l'attente que d'éventuelles études scientifiques sérieuses ne les absolvent. « Déclarant que les émissions de CFC sont « une cause légitime d'inquiétude », le rapport conclut qu'« à moins que de nouvelles preuves scientifiques ne soient trouvées pour supprimer la cause d'inquiétude, il semble nécessaire de restreindre les utilisations de CFC-11 & -12 au remplacement des fluides de réfrigération existants et aux équipements d'air conditionné ('to restrict uses of (CFCs) 11 and 12 to replacement of fluids in existing refrigeration and air-conditioning equipment'), ainsi qu'aux systèmes clos recyclés ou à d'autres utilisations dont ne résulte aucune libération dans l'atmosphère. » En d'autres

[263] La progression des CFC dans les produits civils fut importante peu après l'obtention d'un premier brevet, le 31 décembre 1928 (par Frigidaire, possédé par General Motors). Elle fut ralentie pendant la Seconde Guerre mondiale, au cours de laquelle le dioxyde de carbone fut alors utilisé en remplacement du CFC-12, dans les réfrigérateurs (Par contre, en 1942, Westinghouse mit au service de l'armée états-unienne la première bombe aérosol à pesticide anti-insecte ('the first CFC-12 aerosol pesticide 'bug bombs'') contenant des CFC). Mais, la production de CFC fut spectaculaire dans les années 1950-60 [Andersen & Sarma, 2002, p. 371]. Dans les années 1970, certains industriels qui fabriquaient ou utilisaient les CFC, DuPont en tête, étaient très puissants, au même titre que des fabricants de cigarette, tel que Brown & Williamson qui sut peser de tout son poids dans la controverse concomitante sur les risques liés au tabac. Toujours à l'image de l'Industrie du tabac, l'Industrie des CFC défendait une technologie relativement ancienne.

Ajoutons que ce type de controverse sur des technologies, dont le marché est déjà étendu, est à contraster avec des controverses sur des *nouvelles (ou récentes) technologies*, tels que le DDT dans les années 1960, les OGM dans les années 1970, ou la géoingénierie à partir de la fin des années 2000, où les acteurs soulèvent des questions propres et utilisent des stratégies différentes. (En 2006, Ralph Cicerone, devenu Président de la NAS, proposera ainsi de copier la procédure utilisée pour les OGM aux Etats-Unis dans les années 1970, afin de décider à termes de la légitimité de la géoingénierie à être mise en œuvre [Cicerone, 2006, p. 224].)

termes, résumeront les historiens Oreskes et Conway, en l'absence de nouvelles informations aptes à réfuter les inquiétudes présentes, [presque] toutes les émissions atmosphériques de CFC devraient être éliminées »… Et le rapport IMOS de renvoyer la suite du travail d'expertise à des instances fédérales, dont le CIAP, dirigé par la NAS, qui doit rendre son rapport à la fin de l'année 1975.[264]

Par ailleurs, les auteurs de *Protecting the Ozone Layer. The United Nations History*, Stephen Andersen et Madhava Sarma, rapportent que, « avant 1975 ('by 1975') », DuPont finance des études de J.E. Lovelock (Reading University UK), J.N. Pitts et J.A. Taylor (University of California), C. Sandorfy (University of Montreal) et R.A. Rasmussen (Washington State University). Elles « confirment que les CFC s'accumulent rapidement dans l'atmosphère ». « JW Swinnerton (US Naval Research Laboratory) a par ailleurs obtenu des résultats similaires » [Andersen & Sarma, 2002, note n° 24 of chapter 5, p. 459, d'après McCarthy Ray & Roy L. Schuyler, (for DuPont), 1975, "Testimony to the Subcommittee on the Upper Atmosphere", US Senate, October 1975]. Dès 1975, les industriels et leurs chercheurs reconnaissent donc que les CFC qu'ils émettent s'accumulent dans l'atmosphère.

Toutefois, le rapport de l'IMOS ne provoque pas moins leur colère, car il préjuge de l'action politique à mener pour réduire ces émissions, alors que l'atteinte à la couche d'ozone stratosphérique, comme ses conséquences sanitaires et environnementales, sont loin d'être prouvées. Les industriels des CFC font part de leur stupéfaction face aux termes conclusifs du rapport de l'IMOS. On la comprend d'autant mieux lorsque l'on sait qu'ils émanent d'un panel qui bénéficie du soutien d'industriels privés. Ces derniers demandent en effet, traditionnellement, d'apporter des preuves d'une agression sur l'environnement ; le cas échéant, ils cherchent à reconduire le vieux principe libéral de 'Best Available Technology', privilégié jusqu'alors aux Etats-Unis (et bien plus largement en Occident) pour gouverner les pollutions de l'air… Or, l'IMOS conseille ici de suspendre l'utilisation de la technologie dans

[264] Parson détaille la logique institutionnelle suivit par l'IMOS :

> "[The IMOS panel] concluded that authority to regulate CFCs existed only for aerosol uses, and was distributed among the EPA, Food and Drug Administration (FDA), and CPSC for different aerosol products. IMOS recommended against new legislation specific to CFCs, arguing that this would establish a cumbersome, chemical-specific precedent; rather, it recommended passage of the Toxic Substances Control Act (TSCA), which would provide authority to regulate CFCs in all uses. […]
>
> "The "deal" went as follows: if no "new information to refute present concerns [was bought about], all atmospheric CFC emissions should be eliminated. […] IMOS put the onus for reversing this stance onto the NAS panel and committee that had just begun their work [of writing the final report]. Noting that the Academy was conducting an "in-depth scientific study" of the issue, IMOS recommended that if the Academy bodies "confirm the current task force assessment," federal regulatory agencies should begin rulemaking procedures to restrict CFC uses, which "could reasonably be effective by January 1978 (*IMOS*, 1975)"." [Parson, 2003, pp. 35-37]

l'attente que preuve soit faite de son caractère non-agressif, c'est-à-dire de se plier à un *principe de précaution*.

L'IMOS, de fait, n'est pas le bras armé de l'industrie CFC. La plupart des industriels des CFC, quant à eux, DuPont en tête, ne l'entendent bien sûr pas de cette oreille. Dans les mois qui suivent la publication du rapport IMOS, ils renouvellent leurs critiques dudit rapport. Ils intensifient, en outre, leurs attaques contre Molina et Rowland, ainsi que contre les experts de l'ozone réunis au sein du CIAP par le DoT et la NAS. Dans l'urgence, l'illustre Académie des sciences s'était en effet trouvée promue instance responsable de l'expertise sur les risques liés aux émissions de CFC.[265]

La communication des industriels des CFC dans les médias

Dès 1975, certains industriels états-uniens se lancent très rapidement dans le développement de substituts aux CFC, et se désolidarisent de la lutte des "anti-anti-CFC".[266] Ces derniers demeurent toutefois nombreux, et comptent parmi eux les principaux producteurs de CFC. Ils adoptent une stratégie de lutte frontale contre toute possibilité de réglementation.

Entre 1974 et 1978, les industriels des CFC communiqueront abondamment dans l'arène médiatique, usant parfois de méthodes que Harold Johnston et la NAS jugeront calomnieuses. « Au cours des années qui suivirent [1974], témoignera Johnston, l'industrie prit l'initiative de polariser la situation et, typiquement, déforma les contenus d'un article scientifique et ridiculisa les portions déformées. Dans son officielle *Lettre aux Membres*, Volume 7, Numéro 1, novembre 1976, la NAS répudi[e en ces termes] la réponse de DuPont à un rapport de ladite NAS du 13 septembre 1976 : « L'action est indigne d'une grande

---

[265] Comme le font remarquer Oreskes et Conway, confier les opérations d'expertise à l'Académie des Sciences est surprenant. *En droit*, on s'attendrait plutôt à voir un organe *de réglementation* tel que l'EPA chargé d'une telle mission. Mais, la *NAS* avait entamé un travail sur le sujet en 1970-71, et allait devoir le mener à son terme [Oreskes & Conway, 2010, p. 113]… Par contre, comme nous le montrons dans le Chapitre 5, les financements de la recherche sur l'ozone stratosphérique seront massivement transférés vers une administration fédérale particulière, la NASA, dès que possible (c'est-à-dire après que la *NAS* eut rendu son rapport, fin 1975).

[266] Parson, 2003, témoigne de précoces mutations d'industriels vers des substituts aux CFC, dès 1975 :

> "[L]arge differences of interest within industry emerged. Sectors and firms differed strongly in how much they depended on CFCs and how easily they could replace them. For reasons of cost and performance, different aerosol products used different propellants: alcohol-based products such as hair spray and deodorant used CFCs, while shaving creams and most cleaning products used hydrocarbons and foods used nitrous oxide or carbon dioxide. Non-CFC aerosols were losing sales along with CFC products, because consumers could not tell the difference. Moreover, all CFC aerosol products could use other propellants or delivery systems, although with some cost increase or loss of performance, product quality, or safety. In 1975, many companies began marketing nonaerosol forms of their products (e.g., hand-pump or squeeze containers), or developing new spray systems or propellants. Attempts to hold a united industry stance increasingly conflicted with the interest of those firms least dependent on CFCs in publicly renouncing them. A crucial break occurred in June 1975, when the Johnson's Wax company announced it would eliminate CFCs from its products – which required reformulating only three products of its large line. Other marketers whose aerosols did not use CFCs, or who could easily eliminate them by reformulating products, began advertising their differences – thereby implicitly endorsing the charges against CFCs, despite charges of treachery from their peers." [Parson, 2003, p. 37]

institution qui a depuis longtemps été un contributeur majeur de la recherche en chimie et d'un progrès technologique avisé ('sound technological progress') » (*NAS*, 1976). » [Johnston, 1992, p. 29 ; évènement corroboré par les archives de Parson, 2003, pp. 37 & 303 ("DuPont press release and cover letter, 9/20/76 (76-2-1); NAS Letter to Members 7, no. 1 (11/76): 2–3")]. Quelques mois plus tôt, des industriels ont déjà orchestré une violente campagne de presse. Ils ont offert une interprétation peu scrupuleuse des conclusions intermédiaires du CIAP, exposées lors d'une conférence de presse donnée en janvier 1975, afin de donner l'impression que le CIAP a réfuté les conclusions des Johnston, McDonald ou autre Crutzen [Conway, 2008, p. 135 ; Parson, 2003, pp. 28-29].

La principale stratégie des pro-CFC (qui est, plus généralement, utilisée par l'ensemble des détracteurs de la théorie de la destruction de l'ozone ; voir Sous-chapitre 4.4) consiste à isoler artificiellement certains scientifiques du reste de la communauté scientifique ; et en particulier, bien sûr, les chercheurs identifiés par la presse comme les porte-flambeaux de la menace catastrophiste. On leur reproche leur outrecuidance à accorder un crédit aussi important à leurs études, larvées d'incertitudes, voire on leur fait un procès en idéologie. Harold Johnston, de toute évidence, ne se démonte pas, et fait des objections des industriels une affaire personnelle. Ce qu'elles étaient !, par la nature-même de la stratégie mise en place par les industriels. Johnston, qui a à la fois commis l'article de 1971 sur les SST et a été l'un des premiers soutiens à Molina et Rowland, est une proie de choix.[267]

Mais, Mario Molina et Sherwood Rowland sont incontestablement les plus attaqués. Leur statut de lanceurs d'alerte les met en butte aux soupçons. Pour cette raison, Philip Handler, le président de la NAS (1969-81), a même décidé de les éloigner des comités de rédaction des rapports d'expertise officielle qu'il avait eu la charge de former. Lors de la constitution des deux groupes de travail pour la rédaction du rapport final du CIAP (l'un "scientifique" nommé 'Panel on Atmospheric Chemistry', l'autre focalisé sur les "implications politiques" et intitulé 'Committee on Impacts of Stratospheric Changes'), Handler prendra soin de n'y inclure ni Johnston, ni Molina, ni Rowland, ni Tom Donahue (physicien aéronome et de

[267] Johnston raconte (a) qu'il avait immédiatement pris au sérieux l'article de Rowland et Molina en 1974, pressant la NAS de stimuler des recherches sur la question, mais aussi le Congrès de commencer dès à présent à s'informer sur le sujet. Il fallait même, ajouta-t-il, 'informer le grand public que l'inquiétude [de Rowland et Molina] était légitime » (Johnston & colleagues, 1974 (26 October), in a one-page report for NAS). Mais, (b) ce rapport ne fut jamais publié. En revanche, le zèle de Johnston et ses collègues se retrouva étalé dans les journaux, car « l'un des membres du panel [de la NAS avait] parlé impudemment à un reporter. Un journal titra "Halt urged in buying spray cans that might hurt ozone", et des représentants de l'industrie chimique se plaignirent vertement à la NAS ». Suivit (c) une cabale des pro-industries CFC, notamment dans le journal d'ingénierie *Aerosol Age* (renommé *Spray technology & marketing* en 1991) de novembre 1974. Lors d'une allocution devant le Congrès, le 12 décembre 1974, Raymond McCarthy, de DuPont, ne cessa de répéter qu'il n'y avait, « en fait, aucune preuve scientifique appuyant la théorie chlore-ozone ». (d) Johnston s'amusera à répondre quelques années après aux accusations des industriels de 1974-1975, par une photographie où il exhibait les preuves scientifiques des effets anthropiques sur l'ozone « accumulées » depuis 1971 (cette fois dans un journal scientifique de renom, *Annual Review of Physical Chemistry*). [Johnston, 1992, pp. 28-29]

science spatiale qui, de même que Johnston, témoignera devant l''House Subcommittee on Government Operations' le 13 novembre 1975) [Parson, 2003, p. 301]. Si les quatre scientifiques ne sont pas devenus infréquentables au sein de la communauté scientifique universitaire, ils sont devenus des collaborateurs gênants, car suspects en dehors de la communauté scientifique.

La "mise en quarantaine" n'est toutefois pas respectée scrupuleusement. A l'inverse des Crutzen, Watson, Schiff, Ehhalt, *etc.*, Rowland et Molina ne sont pas intégrés dans les comités de rédaction du rapport ;par contre, ils participent bel et bien à sa construction. Ceci est su de tous : après avoir préparé des tables de constantes de vitesse de réaction pour les modélisateurs du CIAP, il est ainsi de notoriété publique que Rowland participe ensuite à l'expertise de la NAS, et ceci aux côtés des premiers théoriciens de la destruction de l'ozone par les NO_x (H. Johnston) et par le chlore (McElroy). L'information figure en toutes lettres dans le numéro de *Science News* du 5 octobre 1974, sans être présentée comme un 'scoop' [Johnston, 1992, p. 25 ; *Science News* (1), 1974, p. 213]. « Dans les années 1970, suggèrent E. Conway et N. Oreskes, il [est] commun d'exclure des panels d'expertise des scientifiques aux positions connues » (cette pratique est-elle exceptionnelle ?). C'est le cas de « Sherry Rowland, Mario Molina et Tom Donahue, qui [sont] déjà de forts avocats d'une réglementation des CFC [en 1974-75, et] ne [sont par conséquent] pas invités » à participer à l'écriture des rapports de la NAS (Conway et Oreskes ajoutent à leur liste « Harold Johnston », mais il s'agit d'une erreur, puisque celui-ci a dirigé le Chapitre 5 du rapport final du CIAP de 1975)[268]. Toutefois, confirment les deux historiens, les experts du panel constitué par la NAS font appel à ces quatre scientifiques « afin de comprendre les problématiques ». Les lanceurs d'alerte Rowland et Molina ont donc, non seulement bénéficié d'une crédibilité importante au sein du CIAP (… dans lequel se trouvaient de nombreux scientifiques enclins à croire à la possibilité d'une destruction anthropique d'ozone (Johnston, McElroy, Crutzen)), mais n'ont pas été totalement exclus des comités d'expertise officielle. [Oreskes & Conway, 2010, p. 113 ; Parson, 2003, pp. 37-39]

Il faut à présent s'interroger sur l'activité de Rowland et Molina dans les médias, dans les mois qui suivirent la publication de leur article dans *Nature* en juin 1974. Pour commencer, relevons que l'hypothèse des deux chimistes fut rapidement prise au sérieux par différents types d'acteurs. En octobre 1975, Rowland peut se féliciter des retombées de leur article. Leur alerte a fait l'objet de discussions devant le Congrès et de communications

[268] *Cf.* Johnston, H. S., D. Garvin, M. L. Corrin, P. J. Crutzen, R. J. Cvetanovic, D. D. Davis, E. S. Domalski, E. E. Ferguson, R. F. Hampson, R. D. Hudson, L. J. Kieffer, H. I. Schiff, R. L. Taylor, D. D. Wagman and R. T. Watson, 1975: Chemistry in the stratosphere, Chapter 5, CIAP Monograph 1. The Natural Stratosphere of 1974, DOT-TST-75-51, U.S. Department of Transportation, Climate Impact Assessment Program.

d'organisations internationales, et a été qualifiée de « cause légitime d'inquiétude » par un consortium de 14 agences scientifiques fédérales ». De plus et surtout, dès 1975, les experts chapeautés par la NAS ont pris fait et cause pour « l'hypothèse Molina-Rowland ». Certes, la NAS a repoussé ses recommandations en matière de réglementations des CFC jusqu'au terme de la phase d'expertise en cours ; mais, cette dernière s'achève finalement, comme prévu, par la publication d'un rapport, publié en septembre 1976, qui réitère dans ses grandes lignes les conclusions de l'année précédente (même si, là encore, la NAS conseille au Congrès de repousser de quelques mois son vote réglementaire, le temps de confirmer quelques données de laboratoire et d'affiner les prédictions). De plus, la menace environnementale a été suffisamment rapidement médiatisée pour que, dès 1975, les Etats de l'Oregon et de New York réglementent l'utilisation des CFC dans les bombes aérosols. [Rowland, 1975, p. 8 ; 'Interagency Task Force on Inadvertent Modification of the Stratosphere', 1975 **in** Litfin, 1994, chapter 3, p. 9]

L'article de Rowland et Molina, publié dans *Nature* fin juin 1974, n'avait pourtant pas attiré l'attention immédiatement. Ni la presse, ni l'administration fédérale ne relaient l'information pendant l'été 1974. Pas d'agitation non plus au sein de la communauté scientifique. Si bien que Molina et Rowland décident de présenter en personne leurs résultats, à l'occasion de la rencontre de l''American Chemical Society' à Atlantic City, le 11 septembre 1974. « Au cours d'une conférence de presse sans complaisance ('a hard-hitting press conference'), relatera Harold Johnston, ils défendirent leurs travaux et furent explicites au sujet des dommages qui pouvaient advenir » [Johnston, 1992, p. 28]. Autres incursions en dehors de l'arène scientifique : dans les mois et années qui suivent la publication de leur article dans *Nature*, Molina et Rowland s'expriment à plusieurs reprises devant l'élite décisionnaire du pays, lors d'auditions devant les hauts fonctionnaires des agences fédérales et des élus du Congrès… Et, de nouveau, dans l'arène médiatique. A l'évocation de cette période, Rowland déclarera :

> « Le problème chlorofluorocarbones-ozone devint une inquiétude publique, qui bénéficia d'une grande visibilité à la fin de l'année 1974. Elle amena de nombreuses expériences scientifiques, ainsi que des audiences législatives, une couverture médiatique large, et, pour moi, un planning de déplacements beaucoup plus lourd. » [Rowland, 1995]

Décrire précisément la proactivité de Molina et Rowland dans l'arène médiatique nécessiterait une étude approfondie. D'après nos travaux d'archives et les études qui ont été réalisées sur la controverse de l'ozone dans les années 1970 (Dotto & Schiff, 1978 ; Roan, 1989 ; Parson, 2003), la présence de Rowland et Molina dans l'arène médiatique entre 1974 et 1976 est certes attestée ; mais, les deux chimistes prirent manifestement soin de s'y exprimer

rarement et prudemment. Mettons de côté les entretiens de Rowland et Molina dans la presse quotidienne, corpus que nous n'avons pas étudié. Dans les archives de la presse scientifique grand public, nous avons uniquement trouvé quelques articles publiés dans la revue de vulgarisation scientifique *New Scientist*.[269]

Alors que, comme nous verrons dans le Sous-chapitre suivant, le météorologiste Richard Scorer fait des lignes de *New Scientist* un usage très polémique (*Cf.* Scorer, 1975), les articles de Rowland et Molina dans cette même revue et à la même période consistent en des *actes de défense de la "scientificité" de leurs travaux, en réponse à des attaques d'industriels des CFC*. Les deux chimistes observeront cette ligne de conduite prudente pendant les quatre années de "crise" entre l'alerte de 1974 et l'entrée en vigueur de premières réglementations sur les CFC (1978). Une telle posture était en effet la plus à même de préserver leur légitimité, en apaisant les soupçons de "militantisme environnementaliste" qui planaient sur eux. Elle était rendue possible par l'attitude de la NAS (et de l'IMOS), qui prolongea le travail de mobilisation initié par Molina et Rowland, en répétant qu'elle accordait une crédibilité suffisamment forte à leur hypothèse pour réclamer des responsables politiques qu'ils adoptent un principe de précaution.

Il n'en demeure pas moins que, tout au long de la controverse de 1974-78, les détracteurs des réglementations des CFC assaillent en priorité les deux lanceurs d'alerte Molina et Rowland. Ils cherchent à leur faire incarner, à eux seuls, l'alerte catastrophiste sur la destruction de l'ozone, donc à les isoler d'autres scientifiques respectés qui soutenaient leur hypothèse :

---

[269] Une étude particulière – qui reste à mener – pourrait permettre de cerner de façon précise le champ d'action de Molina et Rowland dans les années 1970. Dans son ouvrage *Ozone Crisis*, publié en 1989, la journaliste Sharon Roan cite quelques évènements médiatiques (conférences de presse, citations de journalistes, articles dans la presse de vulgarisation scientifique) impliquant Molina et surtout Rowland entre 1974 et 1976, mais sans jamais parvenir à démontrer une présence "anormalement" grande dans les médias, durant cette période où la controverse était la plus intense et où les deux chimistes entretenaient des liens ténus avec le groupe d'experts de la NAS. Dans la mesure où ils avaient été les premiers lanceurs d'alerte sur les CFC, leur activité médiatique aurait pu être beaucoup plus importante. En outre, Roan n'établit aucun lien entre les deux chimistes et des organisations de la société civile. Dans le récit que Roan fait de la controverse autour des CFC entre 1973 et 1988, la prééminence des deux figures est pourtant telle, que l'éditeur a pris le parti de ne pas fabriquer d'entrées « Molina » ou « Rowland » dans son Index [Roan, 1989, p. 270] ! Toutefois, comme nous l'avons laissé entendre dans notre introduction au chapitre, l'ouvrage de Roan relève du récit journalistique, et non de la littérature en sciences humaines – ne serait-ce que, pour commencer, parce que les évènements qui sont utilisés pour construire le récit ne sont nullement référencés (l'auteure s'en tenant à une sommaire « bibliographie » en fin d'ouvrage, qui est loin de fournir toutes les sources attendues). (C'est pourquoi, à l'inverse de nombreux auteurs de tous bords qui ont écrit sur l'affaire politique, nous ne citons jamais Roan, 1989.)

Seule certitude : contrairement à Johnston (dont la carrière ne s'acheva pourtant pas dans les années 1970), ni Molina, ni – moins encore – Rowland, ne s'en tiendront à ce premier fait d'armes des années 1970. On retrouvera Rowland en première ligne pour défendre l'hypothèse du trou de la couche d'ozone antarctique, après 1985, aussi bien dans la littérature scientifique aux côtés de nouvelles personnalités importantes de la science de l'ozone (Ex : l'article "On the depletion of Antarctic ozone", que Rowland coécrira notamment avec Susan Solomon et Donald Wuebbles, pour *Nature* (1986)), que dans l'espace médiatique. Molina, quant à lui, restera dans le giron des recherches scientifiques sur l'ozone. Il poursuivra ses recherches sur la destruction de l'ozone à Irvine, après 1973, puis, en 1982, il rejoindra le 'Jet Propulsion Laboratory' de la NASA. Entre temps, l'agence fédérale était devenue l'un des deux géants de la science de l'ozone, avec la NOAA. (Voir Chapitres 5 & 6)

Crutzen (qui participe au CIAP en 1974, aux côtés de Watson et Schiff) ; McElroy ; Hunten, *etc*. Si les communicants de l'industrie des CFC pointent du doigt des insuffisances dans la théorie scientifique des deux chimistes (voir Section suivante), ils condamnent par-dessus tout *leur prétendu "double langage", selon qu'ils communiquent dans l'arène scientifique* ou *dans l'arène politique devant les commissions fédérales*.[270] Molina, et plus encore Rowland, sont accusés de pousser à une action réglementaire rapide, en exagérant l'urgence de la réponse à apporter à la menace sur l'ozone lorsqu'ils se trouvent face à des décideurs politiques ou leurs conseillers.

L'une des passes d'armes médiatiques oppose les deux collègues de l'Université de Californie à deux chercheurs de DuPont, TL Cairns et JP Jesson. Le 12 décembre 1975, sont publiés dans la rubrique « Lettres » de *Science*, un billet indigné de Molina et Rowland dénonçant une publicité de "propagande" récemment publiée par DuPont (« dans le numéro de *Science* du 3 octobre 1975, pp. 8 & 9 »), ainsi que la réponse de Cairns et Jesson. La « lettre » de Molina et Rowland dénonce avec fermeté une « publicité payante » de DuPont, qui avait été publiée dans *Science* (le 3 octobre) ainsi que « dans d'autres journaux et magazines ». Celle-ci, protestent les deux chimistes, les accusait à tort de « faire des estimations sur des réactions [chimiques] hypothétiques ». Or, répondent Molina et Rowland, toutes les constantes de réaction ont été mesurées en laboratoire, et les paramètres atmosphériques (intensité des rayonnements solaires, concentrations) ont été directement mesurés dans l'atmosphère.

De plus, la publicité a évoqué des « conclusions » douteuses qui auraient été tirées par les « modélisateurs » Molina et Rowland, comme ils sont qualifiés. Et, elle les a accusés, toujours à tort selon ces derniers, d'avoir exigé « une *action immédiate* sur l'utilisation des fluorocarbones », ainsi que d'avoir affirmé que la réaction de destruction d'ozone était « *le seul moyen de détruire les fluorocarbones* dans l'atmosphère ». Or, ironisent Molina et Rowland, « ces conclusions ont manifestement été tirées par les auteurs de la publicité eux-mêmes ».[271] [Molina & Rowland, 1975, pp. 1038-1040]

En réponse, Cairns et Jesson nient d'abord le fait que leur employeur ait jamais attaqué le travail *scientifique* des deux chimistes… Ce que faisait pourtant l'encart publicitaire, ne

[270] Il ne semble pas que les industriels accusent Molina et Rowland de manipuler les médias, ce qui va dans le sens de notre constat ci-dessous, selon lequel les deux chimistes ont été peu actifs dans l'arène médiatique.

[271] La suite du texte réfute de plus quatre autres « affirmations » scientifiques de la publicité de DuPont. Avant d'être conclu par une réitération de l'hypothèse de 1974, que leurs auteurs présentent comme plus certaine qu'un an et demi auparavant :

> « Notre conclusion originale était que, aux taux actuels d'utilisation technologique, les fluorocarbones 11 et 12 étaient les deux plus importants composés fabriqués par l'homme en matière d'effets potentiels sur la couche d'ozone. Cette conclusion tient toujours et a été amplifiée et soutenue par de nombreuses études, comprenant des observations directement menées dans la stratosphère, ainsi que des calculs plus détaillés de destruction d'ozone. » [Rowland & Molina, 1975, p. 1039]

serait-ce qu'en soulignant l'absence de mesures atmosphériques confirmant leur théorie. Puis, ce que font Cairns et Jesson dans leur lettre, en formulant des objections plus théoriques, notamment sur les aspects dynamiques non pris en compte par Molina et Rowland (Cairns et Jesson entendent justifier et préciser les arguments scientifiques qui avaient été utilisés dans l'encart publicitaire). Mais surtout, Cairns et Jesson dénoncent *le ton "militant"* qu'emploieraient selon eux les deux chimistes, Rowland en particulier, *dans les arènes extrascientifiques*. Ils reprochent ainsi par exemple à Rowland d'avoir explicitement « demandé l'interdiction des fluorocarbures dans les bombes aérosols » lors d'une allocution devant le Sous-comité de la Santé publique et de l'Environnement de la Chambre des Représentants ('House subcommittee on public health and the environment') en décembre 1974. Or, poursuivent Cairns et Jesson, « comment se fait-il que [par ailleurs] d'autres scientifiques éminents, non reliés [non plus] à l'industrie, ont déclaré que les preuves n'[étaient] pas concluantes, et qu'une interdiction [était] prématurée ? » [Cairns & Jesson, 1975, pp. 1040-1041].[272]

Les sources que nous avons utilisées indiquent que, suite à la publication de leur article dans *Nature*, Rowland et Molina ont adopté une attitude très prudente, devant donner la plus forte impression de neutralité, de scientificité. S'ils n'ont laissé passer aucune communication ambiguë de DuPont qui laissait entendre que leur alerte sur la destruction de l'ozone par les CFC ne reposait sur aucune base scientifique (et notamment, empirique) solide, ou qu'elle avait été surinterprétée et ne nécessitait pas d'action politique rapide (rapide ne signifiant pas « immédiate », préciseront Molina et Rowland), ils se firent rares dans les médias de grande audience. En outre, à l'image de leur démonstration dans la « Lettre » à *Science*, ils ont scrupuleusement évité d'aborder les questions de société relatives à la réglementation

[272] Extrait de Cairns et Jesson, 1975 :

> "Du Pont's advertisement was not intended to attack the published scientific work of Rowland and Molina on ozone depletion, which, as we have said before, we believe to have raised a significant point. The principal source of misunderstanding appears to be that the authors interpret the advertisement to say they made certain assumptions in their "actual research." To the contrary, the assumptions lie in the products of their research particularly in the public position taken by Rowland with regard to the implications of his research. […]
>
> "We are firmly of the impression that Rowland has been asking for immediate regulation of fluorocarbons, although not, of course, in his "refereed scientific articles." As early as December 1974, Rowland testified before the House subcommittee on public health and the environment that he believed the use of fluorocarbons as aerosol propellants should be banned now. […] All of the above would indeed be academic if it were not for the fact that Rowland has asked for a fluorocarbon ban. This is the stage at which the implicit assumption of correctness of the conclusions enters the picture. If that is not the case, how is it that other eminent scientists, not related to industry, have said the evidence is not conclusive and a ban is premature? […]
>
> "Large-scale government and industry programs are under way. Under these circumstances, reason would appear to dictate that we should permit science to pursue its normal course to enable public Policy-makers to make informed judgments based on fact." [Cairns & Jesson, 1975, pp. 1040-1041]

des CFC, que ce soit dans leurs publications dans des revues à comité de lecture ou dans la presse grand public.

Par exemple, le texte de Rowland publié dans le *New Scientist* le 2 octobre 1975 est prudemment qualifié de « rapport d'étape » ('status report') par son auteur. D'une longueur de quatre pages, "Chlorofluoromethanes and stratospheric ozone – a scientific status report" prend place au cœur d'un dossier spécial intitulé "Fluorocarbon File", d'une étendue totale de quinze pages [*New Scientist*, 1975]. La démonstration de Sherwood Rowland se veut celle d'un scientifique de l'atmosphère, courbes et équations à l'appui. Son but premier est manifestement de répondre aux calomniateurs qui ont qualifié sa théorie « d'hypothèse, de spéculation, et de parfaite ânerie ('utter non-sense') ». Il invoque l'autorité naturelle de la bonne méthode scientifique dont lui, chimiste universitaire confirmé, connaitrait la formule. Plus étonnant, ce « rapport d'étape » est présenté par le comité de la revue comme « constitu[ant] la base du témoignage du 'Professor Rowland' délivré la semaine [précédente] devant le Sous-comité 'ad hoc' sur la haute atmosphère de l''US Senate Committee on Aeronautics and Space Science' ». Sa « base », peut-être ; mais, il est fort douteux que les questions des cibles prioritaires des réglementations de CFC et de l'allure à laquelle les réaliser n'aient pas été abordées lors de l'allocution (comme elles l'avaient été devant le Sous-comité de la Santé publique et de l'Environnement de la Chambre des Représentants en décembre 1974, au grand dam de DuPont)… Les pages des journaux scientifiques ou de vulgarisation scientifique constituent pour Rowland un lieu de « purification » de ses discours, voulus scientifiques, en en excluant prétendument la société (*cf.* Latour, 2006 (1991)). Les conseils sur les réglementations de CFC à mener, qui sont tenus devant les décisionnaires politiques, sont alors bannis, pour laisser place à un langage à l'apparente "scientificité parfaite".

Par ailleurs, lorsqu'il se lance, comme J. McDonald quatre ans auparavant, dans des considérations épidémiologiques alarmistes (même si elles sont trois fois moins alarmistes, puisque le ratio "nombre de cancers de la peau/diminution d'ozone" est trois fois moins important que celui de McDonald), Rowland prend soin de se placer sous l'autorité de la NAS – qui a par ailleurs, répétons-nous, déjà montré une sympathie pour son hypothèse de destruction de l'ozone par les CFC. Il écrit :

> « La NAS a conclu que, « bien que la fréquence des cancers de la peau soit influencée par divers facteurs, les preuves que la première cause de maladie soit les radiations uv-B sont fiables ('the evidence is good that...'), et « une estimation raisonnable du pourcentage d'augmentation du nombre de cancers de la peau [...] peut être réalisée en faisant l'hypothèse qu'1 pourcent de diminution de

> l'ozone stratosphérique causera grossièrement 2 pourcent d'augmentation du nombre de cancers de la peau. » » [Rowland, 1975, p. 11][273]

Après une démonstration de chimiste sur les effets des CFC sur la couche d'ozone, Rowland insiste donc sur la gravité potentielle de ses effets sanitaires – hypothèse que rejette le médecin Arthur Jones dans le même numéro du 2 octobre 1975.[274] Rowland ajoute, en sus, une hypothèse formulée il y a peu par V. Ramanathan, qui prévient que les CFC sont également de puissants gaz à effet de serre. On lit entre les lignes que Rowland cherche à provoquer une réponse politique rapide. Toutefois, il faut insister sur le fait que sa méthode de rédaction qui consiste, à la fin de son article, à mettre en garde contre les conséquences pour l'homme du phénomène qu'il a décrit et à renvoyer à des études récentes relevant d'autres disciplines scientifiques (épidémiologie et science du climat global), est des plus communes dans la littérature scientifique [Rowland, 1975, pp. 8-11]. De surcroît, au cours de

---

[273] Rowland ne cite pas la référence exacte du rapport de la NAS en question. Il s'agit selon toute vraisemblance d'une étude de la NAS datée de 1973, qui prenait donc place dans la controverse sur les impacts sanitaires indirects des SST. Le magazine de vulgarisation scientifique états-unien *Science News* en tira une liste à la Prévert des impacts de la destruction anthropique de l'ozone à prendre au sérieux :

> "[This] 1973 National Academy of Sciences study on the biological impact of increased ultraviolet radiation, conducted during the debate over the environmental safety of SST's, found that a five percent decrease in ozone could produce at least 8,000 extra cases of skin cancers per year in the U.S. white population. (Skin pigmentation shields many of the harmful rays.) Skin aging in general also would be accelerates by increased ultraviolet exposure. Changes in solar radiation levels could harm phytoplankton in the oceans, which produce much of the earth's oxygen. Insects see in a portion of the ultraviolet spectrum and light intensity changes in this region could affect insects' perception of skylight, flower colors and sexual markings. And many plants, particularly agricultural species, are damaged by ultraviolet light." [*New Scientist*, 1974(1), pp. 212-213]

[274] Dans le même numéro du *New Scientist*, le « Dr Arthur Jones », « chercheur scientifique à l'université de Cleveland, Ohio » – une rapide recherche sur Internet indique qu'il n'a laissé nul souvenir marquant, ni dans son Université de Cleveland, ni dans la littérature oncologique –, signe un article "ozone depletion and cancer" devant mettre en doute les conclusions alarmistes de l'IMOS et de la NAS sur la possibilité d'une vague de cancers en cas de destruction de l'ozone stratosphérique :

> "According to the IMOS report, *Fluorocarbons and the environment*, issued earlier this year, "There is persuasive, although not absolutely conclusive, clinical and epidemiological evidence of a direct link between solar radiation and the historically observed incidence of several generally non-fatal (non-melanoma) types of skin cancer in humans". I certainly do not find this evidence conclusive, and believe an alternative case can be made."

L'auteur souligne notamment la diversité des cas inhérents à des facteurs régionaux (Cet argument demeurera au cœur du volet sanitaire de la controverse de l'ozone, au cours des vingt années à venir ; avec, très souvent, un jeu d'aller et venu scientifiquement contestable, entre quantifications moyennes mondiales censées faire preuves, et des différenciations toujours plus subtiles entre régions du monde) :

> "On a world basis, many factors appear to play a more important role in skin cancer fatalities than UV intensity [… since] the lowest reported skin cancer death rates in the world come from Mauritius and Nicaragua, even though they are located in near equatorial regions. […] Evidence is strong that UV intensity is not the principal factor in determining the skin cancer death rate. Genetic factors, skin pigmentation, behavioural characteristics, medical facilities, broad straw hats, and suntan lotion all have some influence on sin cancer fatalities."

Et Jones d'ajouter, par ailleurs, ses doutes quant à l'hypothèse des physico-chimistes de l'atmosphère, cette fois :

> "Some authors have recommended an immediate ban on the use of fluorocarbons without any direct evidence that they affect the ozone layer. To me the indirect evidence strongly suggests that these compounds are unlikely to have a significant effect on the Earth's ozone layer"

(De quelles « preuves indirectes » nous parle-t-on précisément ? La lecture du court article d'une demi-page ne nous permet pas de le savoir.). Avant de revenir à son domaine d'expertise, pour ajouter :

> "and, even if they did, an increase in skin cancer deaths would not necessarily result." [Jones, 1975 **in** *New Scientist*, 1975, p. 14]

la période charnière 1974-1978, Rowland et Molina se risquent tout juste à écrire le mot « bouclier » pour désigner la couche d'ozone (en 1974, Rowland intitula un article pour le même journal *New Scientist* : "Aerosol sprays and the ozone shield").

Si, en 1974, Mario Molina est un jeune chercheur dont on ne peut présumer des positions politiques, Sherwood Rowland a derrière lui un parcours universitaire de trois décennies. Or, rien dans celui-ci ne trahit quelque élan pour la défense de l'environnement. Après-guerre, Rowland a embrassé une carrière de chimiste de laboratoire, principalement dévolue à la « chimie des atomes chauds », sans lien avec les pollutions environnementales. Une communication de Lovelock en 1972 l'avait conduit à s'intéresser aux CFC ; en tant que chimiste cinéticien et photochimiste, [se justifiera-t-il, il] sav[ait] que de telles] molécule[s] ne pouvaient rester inertes dans l'atmosphère pour toujours » [Rowland, 1995]. Mais, Rowland avait publié quelques années plus tôt (en 1971) un article réfutant la contamination au mercure des thons et des espadons commercialisés par des industries privées.[275] Rien n'indique, en tout cas, que Molina et Rowland fussent animés au début des années 1970 par quelque élan patrimonial pour l'environnement (pas plus qu'il n'existait chez Harold Johnston d'élan pour la défense de l'environnement global)… Contrairement à l'un de leur détracteur sur la question de l'ozone, le météorologue Richard Scorer, par exemple (voir les sous-chapitres suivants).

Contrairement à Scorer, toujours, Rowland et Molina ne remirent nullement en question le modèle économique et industriel dominant dans son ensemble. En revanche, il faut souligner que, dans le cas des produits chimiques particuliers que sont les CFC, ils osèrent franchir un pas pour changer la nature des réglementations : les deux chimistes ne misèrent pas exclusivement sur les innovations technologiques pour circonscrire ses

[275] L'article fut publié dans *Science* (G E Miller; P M Grant; R Kishore ; F J Steinkruger; F Sherwood Rowland; V P Guinn, 1972, Mercury concentrations in museum specimens of tuna and swordfish, Science, 175(4026), pp. 1121-1122). Lovelock fera référence à ce travail dans Lovelock, 2000 (1979). D'après la journaliste Sharon Roan, bien qu'admirant la carrière de chimiste de Rowland, Lovelock n'en aurait pas été moins sévère avec l'Américain au sujet de sa conviction que nous étions menacé par une destruction anthropique de l'ozone :

> Roan: "Speaking to a British newspaper reporter later that month [(of late 1974?, of early 1975?)], Lovelock chastised the American scientists for making such a big deal over CFCs. He criticized Rowland for "oversimplifying" the facts and called for a "bit of British caution." 'I respect Professor Rowland as a chemist, but I wish he wouldn't act like a missionary," the outspoken chemist said. "This is one of the more plausible of the doomsday theories, but it needs to be proved. The Americans tend to get into a wonderful state of panic over things like this. It's like the great panic over methyl mercury in fish. The Americans blamed industry until someone went to a museum and found a tuna fish from the last century with the same amount of methyl mercury in it." That "someone" happened to be Sherry Rowland. In 1971, Irvine chemist Vincent Guinn, a forensic chemist, and Rowland had quieted the fears of fish-eating Americans by showing that tuna and swordfish naturally contained certain levels of mercury. Although that environmental flap was a minor one compared with the ozone issue, the Irvine group had, however briefly, become heroes to the fishing and food industries, much to the chagrin of some environmentalists." [Roan, 1989, p. 29]

Cette anecdote est partiellement reproduite dans Jackson Robert Bradley, 2002, *The Earth Remains Forever: Generations at a Crossroads*, p. 74. Mais, dans aucun des deux cas les sources ne sont indiquées.

pollutions, mais réclamèrent, et ceci très précocement (dès décembre 1974, soit six mois seulement après la publication de leur alerte) d'envisager rapidement des interdictions. Or, comme l'ont souligné plusieurs analystes dont Karen Litfin (Litfin, 1994), cette méthode coercitive allait à l'encontre de la tradition états-unienne de l'*EPA* et de ses prédécesseurs, qui privilégiait une approche incitative en faveur de mutations technologiques dans les secteurs d'activité producteurs et émetteurs de polluants particuliers. Ceci explique en partie pourquoi Molina et Rowland furent attaqués de manière aussi virulente, et pourquoi l'industrie des CFC croyait en ses chances de retourner l'opinion et les élus en sa faveur.

Mais, même si la dénégation de l'appel à adopter des mesures contraignantes au nom du principe de précaution pouvait encore l'emporter en 1975, et même si Rowland et Molina, qui avaient appelé à des interdictions de produits émetteurs de CFC dès décembre 1974 puis avaient renouvelé la demande devant les commissions fédérales au cours des mois suivants, pouvaient être légitimement accusés de tenir un "double langage", DuPont et ses alliés ne parvinrent jamais à décrédibiliser l'hypothèse de Rowland et Molina. Tout le moins, jamais suffisamment pour faire refluer la vague réglementaire, qui fut envisagée dès 1975 par l'EPA, l'ONU (OMM et UNEP), ou encore par les pays scandinaves. Rowland et Molina ne cédèrent jamais aux sirènes des médias. Y compris dans l'ouvrage *Ozone Crisis* de Sharon Roan, qui a suivi l'activité de Rowland et Molina plus que de tout autre acteur de la controverse, le caractère proactif et/ou polémique de l'entreprise des deux chimistes n'est nullement démontré [Roan, 1989]… Que dire, à l'inverse, de l'utilisation avide par DuPont des colonnes de la presse populaire et même d'encarts publicitaires, dont les règles discursives sont manifestement moins rigoureuses, "moins scientifiques" que celles des journaux où publièrent Molina et Rowland ou celles en vigueur dans les comités de la Chambre des Représentants ?

Outre la prudence de Molina et Rowland, la raison pour laquelle les deux lanceurs d'alerte n'avaient pu être isolés par les industriels résidait dans le fait que les dispositions du CIAP, dont le choix des membres avait incombé à des dignitaires de la NAS, étaient dès le début favorables à la proposition théorique de Rowland et Molina. De plus, la jeune *EPA* (1970-…) avait elle rapidement montré des signes de volonté d'ajouter les CFC à sa liste de produits réglementés. Au fil des mois écoulés entre mi-1974 et 1977, DuPont vit ses chances d'annihiler une réglementation des CFC s'étioler. L'industriel se trouva pris au piège : condamné à faire feu de tout bois dans la presse, il ne fit qu'affaiblir un peu plus la confiance portée à son expertise scientifique alternative à celle de la NAS. De plus, comme nous le montrons dans la section suivante, le processus accéléré d'expertise de la NAS, de l'IMOS et du CIAP entre 1974 et 1976 avait prit de vitesse la science aéronomique de DuPont et ses alliés, qui en n'était qu'à ses balbutiements.

Les poussifs débuts de l'expertise scientifique privée

Dès son premier rapport de la fin de l'année 1974, la NAS jugea crédible l'hypothèse de Rowland et Molina, et proposa de réglementer des produits émetteurs de CFC au nom du *principe de précaution*. Lors de la controverse sur les SST (1970-71), certains élus fédéraux avaient déjà fait usage de ce principe, également en lien avec la destruction de l'ozone. Toutefois, le péril de la couche d'ozone n'avait sans doute alors pas été décisif dans le vote des chambres représentatives, et la thèse de la destruction de l'ozone avait même été moquée par certains membres du Congrès. En 1974, adopter un principe de précaution au sujet de la nouvelle menace de destruction de la couche n'allait pas non plus de soi pour les élus. Les détracteurs du "catastrophisme ambiant" et des règlementations des CFC, les industries incriminées en tête, entendaient bien mettre à mal l'impression d'évidence rationnelle des réglementations, que cherchaient à inculquer la NAS, Molina, Rowland ou Johnston.

Cinq cibles se trouvent alors à portée d'arc des dissidents. D'abord, (i) en cette période de crise économique (l'onde de choc du premier choc pétrolier), l'industrie des CFC peut aisément *jouer sur les menaces sociales* que feront peser sur les travailleurs des réglementations de CFC. Elles ne manqueront pas, selon le lobby industriel, de réduire l'activité du secteur. DuPont lui-même, pourtant l'une des entreprises les plus prospères des Etats-Unis, n'hésite pas à tirer sur cette corde sensible. Un encart publicitaire signé de la main du directeur de l'entreprise, Irving Shapiro, publié dans le *New York Times* du 30 juin 1975 puis reproduit dans le *New Scientist* du 2 octobre, ose le titre : « La couche d'ozone *vs* l'industrie des aérosols. DuPont souhaite les voir survivre toutes les deux ('The ozone layer *vs.* the aerosol industry. DuPont wants to see them both survive') » [DuPont, 1975 **in** *New Scientist*, 1975, p. 17].

Puis, (ii) les détracteurs pouvaient *contester l'hypothèse sanitaire* d'une augmentation importante des cancers de la peau en cas d'endommagement de la couche d'ozone (Rappelons que, depuis 1971, le débat public et scientifique avait été – durablement – cadré pour que la principale menace associée à une destruction de l'ozone stratosphérique soit sanitaire – et non climatique). De plus, (iii) *l'usage du principe de précaution allait être décrié*. Il fut contesté en droit, à une époque où il était discuté depuis quelques années seulement, et où il n'était pas inscrit dans les textes juridiques, ni états-unien ni internationaux ; mais, il s'agissait également de dénoncer à travers lui des discours catastrophistes inhérents à des postures jugées idéologiques ou à des attitudes phobiques face aux pollutions industrielles. Ensuite, (iv) les industriels soulignaient inlassablement *le déficit de mesures atmosphériques* systématiques, à grande échelle, et sur le moyen terme. En 1974, un scientifique de DuPont nommé McCarthy avait déclaré, en forme de défi à la recherche chapeautée par la NAS, que son employeur accepterait volontiers de se plier aux conclusions de « n'importe quel

programme expérimental crédible » [McCarthy, 1974 **in** Parson, 2003, p. 33]. Enfin, (v) *l'hypothèse physico-chimique de Rowland et Molina, qui avait été jugée très crédible par la NAS, allait faire l'objet d'objections scientifiques*. Nous allons nous focaliser sur ces deux derniers points "scientifiques", et en particulier le dernier. Nous montrons que les experts de l'industrie, qui en 1974 ne possédaient guère de compétences en aéronomie, furent pris de court par la vitesse avec laquelle l'hypothèse chimiste de Molina et Rowland sur le risque de destruction de l'ozone par les CFC fut relayée (par la NAS, par les médias, devant le Congrès).

Une première objection scientifique à l'hypothèse de destruction de l'ozone par les CFC consiste à souligner le fait que la quantité relative des émissions anthropiques est faible par rapport aux émissions naturelles. A l'échelle globale, les volcans, notablement, sont des émetteurs de chlore autrement plus conséquents que les activités humaines. Les industriels utilisèrent cet argument. Ils mirent même en scène l'éruption à venir d'un volcan en Alaska (en janvier 1976), expérience cruciale qui devait donner la preuve que le chlore stratosphérique provenait principalement des volcans. Mais, ironiseront Conway et Oreskes, le volcan « ne fit manifestement pas ce que [les gens de l''Industry Council on Atmospheric Sciences'] espéraient, puisque le groupe d'industriels ne fit jamais l'annonce de ses résultats, au-delà du constat qu'ils étaient peu concluants ('inconclusive') » [Oreskes & Conway, 2010, p. 115].[276]

D'autres objections scientifiques furent mises sur la table par les chercheurs financés par l'industrie. Des mesures d'ozone signalent-elles une diminution des concentrations moyennes d'ozone global, demandent-ils ? Non, c'est même la tendance inverse qui a dominé au cours des années 1960. Les modèles numériques ne sont-ils pas autant

[276] En 1975, des industriels pro-CFC tentèrent – mais échouèrent – à faire de l'éruption d'un volcan alaskien, l'expérience cruciale qui décrédibiliserait les croyants en une destruction importante de la couche d'ozone par les CFC. Oreskes et Conway relatent ainsi l'événement :

> "When volcanoes erupt catastrophically they send ash, dust and gases [, and hence chlorine,] into the stratosphere. […] Volcanoes also erupt a lot of water vapor, and soot-and-dust-laden rain (often black) falls during or just after eruptions, as the water condenses. Chlorine is easily dissolved in water and some of it therefore rains out. This phenomenon was understood qualitatively in the mid-1970s but not quantitatively, so the industry Council on Atmospheric Sciences decided to make a big show of proving that most of the chlorine would reach the stratosphere. They held a press conference in October 1975 to announce their "research" program on an Alaska volcano expected to erupt soon. The volcano erupted at the end of January 1976, but evidently it did not do what they were hoping, as the industry group never announced results, beyond stating they were "inconclusive"."

Avant d'ajouter :

> "Yet the claim that volcanoes were the source of most stratospheric chlorine was repeated well into the 1990s." [Oreskes & Conway, pp. 114-115, d'après Dotto & Schiff, 1978, p. 218]

En effet, les volcans demeurèrent des acteurs centraux de la controverse scientifique sur l'ozone jusque dans les années 1990. Ils servirent en outre un autre type d'argumentation : il s'agira d'utiliser des mesures successives aux éruptions volcaniques pour prouver que, à partir d'une certaine teneur, le chlore – et donc l'homme – pouvait, ou ne pouvait pas, détruire massivement l'ozone stratosphérique.

d'atmosphères fictives qui ne sauraient dire quoi que ce soit de fiable au sujet de l'atmosphère réelle ? La dynamique atmosphérique (troposphère-stratosphère, et à grande échelle) est-elle suffisamment connue et prise en compte ? Toutes les rétroactions ont-elles été prises en considération ? *Etc.* Nous reviendrons sur certaines de ces objections dans le Sous-chapitre suivant, par l'analyse que nous faisons de la contre-expertise scientifique du météorologiste britannique Richard Scorer. Auparavant, nous montrons les écueils que rencontrent les chercheurs de l'industrie privée pour élaborer rapidement une théorie sur l'ozone stratosphérique concurrente à celle des universitaires réunis par la NAS.

Les scientifiques de DuPont ont commencé à travailler sur les impacts environnementaux des CFC avant 1974. Si les CFC sont jugés dignes d'intérêt par les scientifiques au début des années 1970 (par Lovelock, notamment), ce n'est pas tant parce qu'ils atteignent les altitudes où se trouve la couche d'ozone, qu'à cause *des quantités gigantesques et croissantes de CFC* qui sont déversées dans l'atmosphère par l'industrie chimique depuis le tournant des années 1960, et qui *semblent s'être accumulées* – tout le moins en partie – dans l'atmosphère. « Avec le développement de nouvelles applications importantes, écrit l'historien de la 'Michigan Law School' Edward Parson, la production mondiale de CFC avait augmenté de presque 20% par an, au cours des quarante années qui venaient de s'écouler, atteignant un million de tonnes au début des années 1970. » (Voir Figure 29 ci-dessous, pour les deux principaux CFC utilisés, les CFC-11 et CFC-12)

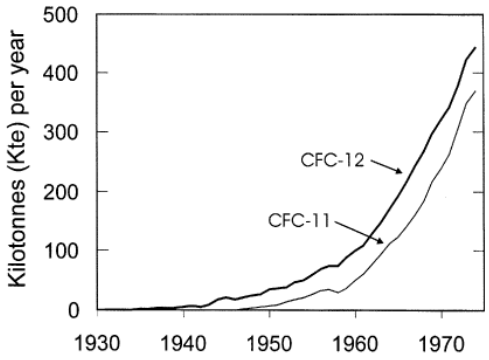


Figure 29 : Production mondiale de CFC, entre 1930 et 1974. Après quatre décennies de croissance rapide, la production mondiale de CFC approchait 1 million de tonnes au début des années 1970. Les aérosols états-uniens en utilisaient alors à eux seuls environ 200 kilotonnes de CFC chaque année
[*Alternative Fluorocarbons Environmental Acceptability Study Data*, 1996 **in** Parson, 2003, p. 22]

Les émissions de CFC sont à imputer à une myriade d'industries, dans différents secteurs d'activités. Bien que les autres propulseurs, tels que les hydrocarbones, les éthers et l'oxyde d'azote soient moins coûteux, les CFC sont le propulseur de choix dans la plupart

des articles de toilette – laque, déodorant, anti-transpirant –, ainsi que dans de nombreuses autres utilisations plus petites, parce qu'ils sont « non combustibles, inodores, et donn[ent] des gouttelettes fines et uniformes », résume Parson. Aussi, « diverses grandes et petites entreprises [seraient] potentiellement affectées [(dans des proportions très différentes)] par des restrictions dans le secteur des aérosols. » Elles comptent parmi elles « des producteurs de CFC, des commercialisateurs ('marketers') de produits d'emballage des aérosols, des remplisseurs d'aérosols ('aerosol fillers') et des fabricants d'équipements associés. » Les grandes entreprises sont celles qui ont le plus à perdre, mais aussi celles qui sont le plus à même d'absorber le choc d'une réglementation, en particulier lorsque, comme DuPont, elles produisent une grande variété d'articles.[277] [Parson, 2003, p. 32]

---

[277] Dans les années 1960-70, la vieille et puissante entreprise de chimie DuPont de Nemours, créée au début du XIX[ème] siècle à Wilmington (nord-est des Etats-Unis) était la plus importante des industries émettrice de CFC. Elle avait été impliquée directement dans la recherche et le développement des CFC. Edward Parson a fait une courte histoire de la technologie, que nous reproduisons ici 'in extenso' :

> "The chlorofluorocarbons (CFCs) are a family of industrial chemicals derived from simple hydrocarbons, principally methane and ethane, by replacing all their hydrogen atoms with fluorine or chlorine. The CFCs with just one carbon atom were cheap and easy to produce because their synthesis process—developed in the 1890s—used cheap raw materials, involved few steps, did not require high temperatures or pressures, and gave high yields of pure finished product. The first commercial application of CFCs, developed in 1928, was as working fluids for refrigerators. The major refrigerants of the time—ammonia, methyl chloride, and sulfur dioxide—were all either dangerously toxic or inflammable (Several major accidents had shown the dangers of toxic refrigerants, particularly in large systems. The worst was a 1929 leak in a Cleveland hospital that killed more than 100 people (Hounshell and Smith 1988, p. 155).). Two scientists in General Motors's Frigidaire division were asked to identify a refrigerant that performed well but was safer, and quickly identified one of the CFCs, CF2Cl2 (dichlorodifluoromethane) or CFC-12 (The discussion of early applications of CFCs that follows draws extensively on Cogan 1988; Manzer 1990; Cagin and Dray 1993; and Hammitt and Thompson 1997.). General Motors and DuPont formed a joint venture, the Kinetic Chemicals Corporation, to commercialize new refrigeration systems based on this chemical. The new venture sold the first home refrigerators using CFC-12 in 1933 and began producing several other related CFCs (CFCs 11, 113, and 114, and HCFC-22) for other cooling applications—industrial and commercial refrigeration, freezing, and air conditioning—through the 1930s. By the mid- 1940s, the new chemicals dominated U.S. refrigeration markets (DuPont developed a numerical system to name the new chemicals, with separate digits denoting the number of fluorine, hydrogen, and carbon atoms in a molecule. The rightmost digit counts fluorine atoms; the second, hydrogen atoms plus one; the leftmost, carbon atoms minus one (dropped if zero). All remaining locations in the molecule are filled with chlorine. Hence, CFCl3 is denoted CFC-11; CF2Cl2 is denoted CFC-12; CHF2Cl is denoted HCFC-22; CF2ClCFCl2 is denoted CFC-113. The letter prefixes used with these numerical codes have changed over time. Initially, DuPont's Freon brand name was in wide generic use, although other firms marketed the chemicals under different trade names after DuPont's patents expired in the 1950s. In early debate over the environmental impact of these chemicals, as DuPont campaigned not to have their brand name used to denote the chemicals generically. They were described by several generic names until usage settled on "chlorofluorocarbons" (CFCs) in the 1980s. Here, the chemicals will be denoted CFC-11, CFC-12, and so on.).
>
> "The new chemicals made good refrigerants because of their thermodynamic properties: they had high vapor pressure, low heat of vaporization, and boiled near atmospheric pressure at a range of temperatures suitable for various cooling applications. In the 1950s, their uses expanded to other cooling applications, including the large chillers that made it possible to air- condition large commercial buildings and indoor spaces such as shopping malls. The same properties made the chemicals suitable for several nonrefrigeration applications as well, most of which were developed during World War II and grew to major commercial markets in the following decades.The largest of these new applications, which by the 1970s became the largest share of total CFC production, was as propellants in aerosol spray cans. The concept of using a pressurized, low-boiling liquid to propel a product through a nozzle as a fine spray was first developed in Norway before the war, then implemented on a massive scale (50 million units) during the war to produce spray insecticides for U.S. troops in the Pacific. These wartime "bug bombs" were propelled by CFC-12, whose high vapor pressure required a heavy can and valve unsuitable for mass-market household products.

Au début des années 1970, donc, quelques scientifiques étudient le devenir des CFC dans l'environnement, et en particulier dans l'atmosphère. Au cours de l'été 1970, James Lovelock signale que les concentrations de CFC-11 et d'hexaflorure de soufre (SF_6 ; utilisé notamment dans la fabrication de produits électriques et électroniques)[278] sont « plus importantes dans l'air provenant d'Europe que de l'Atlantique, ce qui conforte son hypothèse selon laquelle ces composés pourraient être utilisés comme traceurs atmosphériques à grande échelle », rapporte Parson. Lovelock publie ses observations dans *Nature* et les présente au cours d'une conférence lors de l'été 1971. Il échange sur le sujet avec Lester Machta de la NOAA et Ray McCarthy de DuPont.[279] McCarthy, le directeur de recherche de la 'Freon Products Division' de DuPont (service responsable de la production de ses fluorocarbones), réalise alors une estimation de la production historique totale de CFC-11. Elle s'avère « à peu près égale aux » concentrations de CFC que Lovelock a mesuré dans l'atmosphère, ce qui laisse entendre que les CFC-11 ont bel et bien demeuré pour la plupart dans l'atmosphère depuis leur émission. Toutefois, nous sommes en 1971, c'est-à-dire trois ans avant la publication de l'article de Molina et Rowland. DuPont reçoit sereinement les conclusions des travaux de Lovelock, dans la mesure où, ni ce dernier, ni aucun de ses pairs, n'ont alors émis l'hypothèse d'une nocivité des CFC pour l'environnement. [Parson, 2003, pp. 22-23]

James Lovelock poursuit ses travaux sur l'accumulation des CFC, brièvement financé par DuPont (alors qu'il est 'Visiting Professor' à l'Université de Reading au Royaume-Uni).

But mixing CFC-12 with lower-pressure CFC-11 allowed lightweight valves and cans to be used, allowing rapid growth in the 1950s and 1960s as a wide range of toiletries, cleaning products, paints, and insecticides were repackaged as aerosols. By the early 1970s, 200,000 tonnes (metric tons) of CFCs were used in aerosols annually in the United States and the typical U.S. household contained 40 to 50 aerosol cans, half of them propelled by CFCs. It was also during the war that the Dow Chemical Company first used CFC-12 to blow polystyrene into a rigid foam. Blowing the material into a froth while liquid created a structure of extremely fine bubbles which solidified to form a material that was rigid, lightweight, and an excellent thermal insulator. Several other forms of CFC-blown foams were introduced in the 1950s. Flexible, open-celled foams, particularly polyurethane, were used as cushioning in furniture, automobiles, and mattresses. Rigid insulating polyurethane foam blown with CFC-11 had double the insulation value of fiberglass, and quickly surpassed it as the dominant insulating material in buildings and appliances.

"The latest growth use for CFCs, especially the two-carbon CFC-113, was as solvents. Introduced in 1964 as a solvent for dry-cleaning clothes, CFC-113 had only moderate success in this market. But it was ideally suited for cleaning delicate plastics and synthetic materials, and for hand-cleaning of precision metal parts: it was an effective solvent with low toxicity and low contribution to air pollution, and was particularly mild on substrates. Consequently, its use grew rapidly, beginning in the 1970s, in the electronics, computer, and aerospace industries. A second family of chemicals closely related to CFCs, the halons or bromofluorocarbons, was developed in the 1950s by the U.S. Army to fight fires inside tanks and armored vehicles. Halons suppress fires rapidly at very low concentrations without conducting electricity, leaving any residue, or harming people, in part by scavenging the free radicals that propagate flames. Two halons were commercialized in the 1960s and grew rapidly thereafter. Halon 1301 (CF3Br), which had extremely low toxicity, was used for flooding enclosed spaces such as computer rooms, vaults, oil- drilling platforms, and telephone exchanges. Halon 1211 (CF2BrCl), which was slightly more toxic, began widespread use in handheld fire extinguishers in the 1970s." [Parson, 2003, pp. 19-22 & 299-300]

[278] Remarque : le SF6 est également un GES. Il est aujourd'hui réglementé par le Protocole de Kyoto.

[279] Sur cette conversation à la Gordon Conference "Environmental Science: Air" (1971 ; New Hampton), voir Dotto & Schiff, 1978, Gribbin 1988 et Lovelock, 1988. [Parson, 2003, p. 300]

Lester Machta parle de la longue durée de vie des CFC-11 à Sherwood Rowland, lors d'une conférence en janvier 1972. Quant à Ray McCarthy, il développe un programme DuPont sur le devenir des CFC dans l'atmosphère. DuPont débute donc son financement d'une recherche sur les impacts environnementaux des CFC dès 1972. L'industriel organise rapidement une conférence que le sujet, au cours de laquelle 15 producteurs de CFC se mettent d'accord pour mettre en place un programme de recherche conjoint sur le destin environnemental de ces produits chimiques. Le programme est confié au 'Fluorocarbon Program Panel' (FPP), composé d'un scientifique chevronné de chaque entreprise, et placé sous les auspices de la 'Chemical Manufacturers' Association' (CMA). Toutefois, « pour sa première série de projets de recherche en 1973, précise de manière décisive E. Parson, le panel entreprit trois projets déjà initié par DuPont : des mesures supplémentaires de concentrations de CFC dans l'atmosphère ; des mesures du spectre d'absorption des UV par les CFC ; des études de la réactivité chimique des CFC dans la basse atmosphère. » En effet, en 1973, l'hypothèse d'impact environnemental des chercheurs de DuPont ne porte nullement sur les impacts des CFC sur la stratosphère, mais sur *la participation des CFC dans la formation du smog, dans la basse atmosphère*. [Andersen & Sarma, 2002, p. 459 ; *Lovelock's official website*, 2014, "Curriculum Vitae" (2011) ; Parson, 2003, p. 23]

Aussi, lorsque les chercheurs de DuPont et du FPP ont vent des travaux de Molina et Rowland, au tournant de l'année 1974, soit six mois avant la publication de leur article dans *Nature* (« quelques rumeurs et rapports non autorisés avaient circulé », rapporte E. Parson [Parson, 2003, p. 31]), ils sont pris de cours. Les travaux de Lovelock ne les avaient pas alertés outre mesure. De plus, contrairement aux chercheurs du CIAP ou de l'IMOS qui avaient été (partiellement) financés par l'industrie aéronautique pour étudier les impacts des vols SST, les chercheurs de l'industrie des CFC ne s'étaient nullement initiés à la physico-chimie *de la stratosphère* depuis 1971, puisqu'ils avaient privilégié l'hypothèse d'une pollution troposphérique (pouvant affecter l'homme, les animaux, les plantes, les matériaux). Ils ont fait fausse route. Ils se sont, d'une part, focalisés sur les impacts environnementaux directs des CFC au sol. D'autre part, lorsqu'ils ont questionné le caractère chimiquement inerte des CFC dans l'atmosphère (qui est l'hypothèse de Lovelock lui-même), ils l'ont fait, non pour la stratosphère mais pour la troposphère – puisqu'ils ont cherché en quoi les CFC pouvaient contribuer aux pollutions secondaires de type smog, dans la troposphère. Il est vrai que, en ce début des années 1970, l'industrie chimique n'a jamais été menacée par des règlementations inhérentes à l'environnement global, mais toujours liées à des problématiques locales et régionales.

En corollaire, au moment de l'alerte de Rowland et Molina en 1974, les entreprises productrices et utilisatrices de CFC n'ont sous la main aucun expert scientifique apte à

mettre en doute l'hypothèse de Molina-Rowland. Dans un premier, résume Parson, elles « furent incapables de répondre au problème de fond [posé par les deux chimistes]. Le principal véhicule de recherche stratosphérique au cours des trois années antérieures avait été le CIAP, qui avait reçu une participation importante des entreprises aérospatiales, mais aucune des entreprises chimiques ». Ces dernières n'avaient pas vu venir que la prochaine réglementation environnementale importante les concernant pourrait venir de la stratosphère. [Parson, 2003, p. 32]

A présent que l'alerte de Molina et Rowland a été prise au sérieux par la communauté scientifique (leur théorie a été publiée dans une revue largement respectée, *Nature*, puis immédiatement jugée plausible par les membres de la NAS), un programme de recherche privé sur les impacts des CFC se doit d'être mis en place au plus vite. Un volet stratosphérique est ajouté au programme de recherche des industries des CFC en septembre 1974, poursuit Parson. De plus, deux des associations professionnelles de l'industrie chimique états-unienne, la 'Chemical Specialties Maunufacturers Association' et la 'Manufacturing Chemists Association', versent un chèque de 3 à 5 millions de dollars à la recherche scientifique. [Parson, 2003, p. 32 ; Dotto & Schiff, 1978, pp. 149-150]

En outre, dès la fin de l'année 1974, le FPP et DuPont encouragent des scientifiques à pointer chaque incertitude, chaque manquement à l'ethos scientifique de la part des défenseurs de l'hypothèse de la destruction de l'ozone par les CFC. Les chercheurs du FPP et de DuPont se placent en première ligne du combat. Bien que « la plupart des scientifiques que [Karen Litfin interviewera au début des années 1990 diront] ne pas croire que le FPP eût censuré le travail des scientifiques qu'il avait financés, ils [diront avoir] en revanche relevé que les premiers financements étaient allés à des projets susceptibles de saper l'hypothèse de Rowland et Molina » [Litfin, 1994, chapter 3, p. 9] (ce qui n'est pas une surprise).

En 1975 et 1976, années charnières de la controverse où le Congrès s'empare du sujet avec l'intention manifeste de trancher la question au plus vite, l'industrie des CFC ne réussit toutefois à rallier à sa cause *aucun chimiste de l'atmosphère ni aéronome de renom*. De plus, faute de structures et de chercheurs adaptés à la recherche sur les effets des CFC au sein de leurs laboratoires, les quelques millions de dollars débloqués par la 'Chemical Specialties Maunufacturers Association' et la 'Manufacturing Chemists Association' seraient allés en grande partie aux scientifiques universitaires de la recherche publique, témoignera Harold Schiff, l'un des participants à l'expertise scientifique publique menée par la NAS [Dotto & Schiff, 1978, pp. 149-150]. Comme l'a démontré Edward Parson, il ne fut pas possible pour les scientifiques de l'industrie chimique de développer une expertise sur l'invulnérabilité de la stratosphère aux CFC, du jour au lendemain [Parson, 2003, p. 32].

Or, en 1975, DuPont de Nemours, le principal producteur de CFC, et aussi le principal financeur d'expertises scientifiques environnementales parmi les industries de CFC, vient d'ouvrir la plus grande usine de production de CFC au monde, dans le Texas. La firme se doit de fournir au plus vite, d'une manière ou d'une autre, un discours alternatif à celui du CIAP, afin de ne pas subir le même sort que Boeing en 1971. « Prise de court, la réponse initiale de l'industrie fut un méli-mélo d'arguments légalistes génériques ('a jumble of generic legalistic arguments') qui apparurent bêtes même au vu des connaissances de l'époque, et d'attaques personnelles sur ceux qui soulevaient l'inquiétude », tranchera l'historien Edward Parson [Parson, 2003, p. 32].

Certes, il est patent que la position de DuPont se raidit en 1975… ne faisant que renforcer l'impression d'une industrie sur la défensive cherchant à protéger coûte que coûte ses affaires.[280] Toutefois, précisons-nous, les autres travaux de SHS et les archives et que nous avons consultés nous poussent à modérer le jugement d'E. Parson. Dans sa lettre publiée dans le *New York Times* puis dans le *New Scientist* quelques jours plus tard (le 2 octobre 1975), le président de DuPont Irving Shapiro ne cherche pas à ridiculiser l'hypothèse de Molina et

---

[280] Edward Parson décrit ainsi le climat de tension en 1974-75 :

> "While all participants in the early debate agreed that more research was needed, they differed over how much should be done, and by whom, before considering CFC regulation, and what specific findings would warrant either restricting CFCs or setting the issue aside. Industry representatives used one early dynamic modeling calculation to argue that the harm of each year's delay was small, so consideration of potentially unnecessary regulation should await completion of their newly established three-year stratospheric research program. (The calculation, by Crutzen (1974a), indicated that delaying an aerosol ban from 1975 to 1978 would increase peak ozone loss from 1.2 to 1.7 percent, an increase of 0.5 percent.)
>
> "In 1974, in a statement that proved decisive a decade later, DuPont's McCarthy announced that "if creditable scientific data developed in this experimental program show that any chlorofluorocarbons cannot be used without a threat to health, DuPont would stop production of these compounds" (emphasis added) (R. McCarthy, testimony to Rogers and Esch subcommittees, 12/10/74, p. 381). DuPont reiterated the commitment in corporate publications and full-page newspaper advertisements in the spring and summer of 1975, over the signature of Chairman Irving Shapiro (E.g., NYT 6/30/75, p. 30). As was widely noted, the pledge retained the discretion to decide what would count as "creditable evidence," and suggested that industry would rely exclusively on results from their own research in forming this judgment. ("Until the first results of this industry research become available, the available facts do not rank as proof that fluorocarbons will lead to ozone depletion." R. McCarthy in CMR 206, 14 (9/30/74): 1; H. S. Johnston 1992, p. 29; F. S. Rowland, testimony to Rogers and Esch subcommittees, 12/10/74.)"

L'historien distingue plusieurs degrés d'intensité dans la défense adoptée par les porte-parole des entreprises de CFC :

> "Senior managers and scientists from chemical companies were the most temperate, emphasizing the claims' "unproven" character or specific assumptions on which they depended, although they also engaged in some tendentious argument (see, e.g., testimony of I. Sobolev, reprinted in Aerosol Age, 8/75, p. 18; and statements of R. McCarthy at AEB press conference, reported in Drug and Cosmetic Industry (D&CI), 11/74, p. 71; in NYT 11/2/74, p. 59; and in Rogers and Esch subcommittee testimony, 12/11/74, p. 379). More extreme and colorful attacks came from unnamed spokesmen, public-affairs officials, and representatives of aerosol firms. For example, "Extremists in the areas of ecology and consumer protection today are waging a more effective war on American industry than the hosts of enemy saboteurs ever dreamt of doing during World War II" (Robert Abplanalp, acceptance speech for Packaging Man of the Year award, reprinted in D&CI 11/74, p. 70; similar quotations in D&CI 12/74, p. 41; and Aerosol Age, 5/75)." [Parson, 2003, pp. 32-33 & 302]

Rowland. La même année, un chercheur de DuPont précédemment cité, Peter Jesson, l'a même qualifiée de « coup de génie » (même si la sincérité du compliment est bien sûr douteuse). Dans sa lettre, I. Shapiro insistait en outre sur le fait que quelques années de recherche supplémentaires – soit, le temps d'élaborer une expertise s'appuyant sur un nombre conséquent d'expériences (comprendre : le temps que DuPont puisse élaborer une expertise crédible sur le sujet) et/ou de développer des substituts aux CFC – ne mettraient pas en péril la couche d'ozone [*New Scientist*, 1975, p. 18 ; voir Figure 31 en fin de chapitre ; Parson, 2003, pp. 19-24, 32-33 & 299-303]. Cet argument était-il irrecevable ?... Nous montrons dans le sous-chapitre suivant qu'il était, en tout cas, défendu au même moment par des scientifiques de la recherche publique, sidérés par la force de conviction des alertes à la destruction anthropique de la couche d'ozone.

5.2. Le météorologiste Richard Scorer et le géochimiste James Lovelock, deux contradicteurs issus de la recherche publique

En 1975 et 1976, années charnières où le Congrès s'empare de la controverse sur les CFC avec l'intention manifeste de la trancher au plus vite, les scientifiques des laboratoires de l'industrie des CFC se retrouvent illégitimes à parler de la physico-chimie stratosphérique, sujet pour lequel ils n'ont aucune compétence. Par ailleurs, l'industrie des CFC ne réussit à rallier à sa cause aucun chimiste de l'atmosphère ni aéronome de renom. Néanmoins, elle peut compter sur des compagnons de fortune issus de la recherche publique. Parmi eux, deux chercheurs, qui partagent la nationalité anglaise, ainsi que le fait d'avoir accepté d'être financés – très provisoirement – par l'industrie des CFC états-unienne. D'une part, James Lovelock. Précision importante : Lovelock a reçu des financements de DuPont *au début des années 1970*, sans lien donc avec l'hypothèse de destruction de l'ozone, mais afin de poursuivre ses travaux sur l'accumulation des CFC dans l'atmosphère. Au moment où il croise le fer avec Molina, Rowland et les autres, à partir de la fin de l'année 1974, Lovelock n'est donc plus sous contrat avec DuPont. Ajoutons que sa théorie Gaia n'est pas encore très connue des scientifiques, et presque inconnue du grand public (d'où la publication en 1975 de son "The quest for Gaia" dans le journal de vulgarisation scientifique *New Scientist* (Scorer & Sidney, 1975). D'autre part, le météorologiste et Professeur de mécanique théorique à l'Imperial College, Richard Segar Scorer, qui accepte de se faire financer, au début de l'année 1975 par la 'Chemical Specialties Manufacturer's Association', ce que Naomi Oreskes

et Erik Conway qualifieront ironiquement de « tournée américaine » médiatique [Oreskes & Conway, 2010, p. 114].

Dans ce Sous-chapitre, nous montrons que, alors qu'Oreskes et Conway laissent entendre que Scorer ait pu "rouler pour" l'industrie des CFC, il n'en fut rien. Le météorologiste suivait en effet une logique politique personnelle, très différente des atermoiements de l'industrie ou des « marchands de doute » que décrivent les deux historiens.[281] Quant à Lovelock, sa mise en doute de l'hypothèse de la destruction anthropique de l'ozone s'explique selon nous par le paradigme scientifique décrivant l'environnement global dont le géochimiste est porteur. En effet, dans les années 1970, la Gaia que décrit Lovelock évolue chimiquement à long terme, mais nullement à court terme.

[281] « Marchand de doute » est le concept central du livre éponyme d'Oreskes & Conway, 2010 (*Merchants of doubt*). Oreskes et Conway expliquent que le concept de « marchand de doute » leur a été inspiré par l'expression « doute comme produit », tirée d'une note de service ayant circulé en 1969 dans une entreprise de tabac – "doubt is our product, since it is the best means of competing with the 'body of fact' that exists in the minds of the general public" [Oreskes & Conway, 2010, p. 34]. Cette expression se situe dans la lignée de concepts semblables développés au cours des années précédentes par d'autres auteurs, qui ont thématisé le doute comme « produit », et en particulier le doute comme « produit de l'industrie ». Un exemple d'antécédent dans la littérature sur la production du doute par l'industrie : *Doubt is Their Product. How Industry's Assault on Science Threatens your Health* (2008) de David Michaels, qui y analysait les stratégies de consultants recrutés par des industries (principalement l'industrie du tabac), consistant à détourner à leur profit certaines informations, et à jeter systématiquement le doute sur les résultats scientifiques pouvant conduire à l'incrimination des produits de leur employeur [Michaels, 2008]. A la suite de la parution de l'ouvrage d'Oreskes et Conway, de nombreux auteurs ont repris l'expression à leur compte. Ainsi, la journaliste et essayiste française Marie-Monique Robin a intitulé « Science et industrie : la fabrique du doute », la Partie II de son ouvrage *Notre poison quotidien. La responsabilité de l'industrie chimique dans l'épidémie des maladies chroniques* (2011, La Découverte).

Oreskes et Conway exposent rapidement ce qu'ils entendent par "merchants of doubt" (et plus généralement l'activité d'"industry doubt-mongering") à la fin du premier chapitre de leur ouvrage de 2010 [Oreskes & Conway, 2010, pp. 34-35]. Les « marchands de doute » que décrivent Oreskes et Conway sont des *chercheurs financés, occasionnellement, par l'industrie* (ainsi, le célèbre Edward Teller). Ils utilisent parfois comme force de frappe des *'think tanks'* qu'ils ont eux-mêmes créés et/ou dirigés (ainsi, Frederick Seitz, William O'Keefe et Jeff Kueter du 'Marshall Institute'). Enfin, ces « marchands de doute » *possèdent une notoriété, une aura* importante au sein de la communauté scientifique et au-delà, pour des travaux réalisés dans un cadre académique, de recherche publique. Mais, ces acteurs utilisent cette reconnaissance pour intervenir "par la bande" dans *des controverses où ils ne sont pas invités*. En effet, leur compétence scientifique n'a pas été éprouvée dans les champs scientifiques pertinents pour trancher la controverse. Contournant le processus de jugement par les pairs, dénoncent Oreskes et Conway, ces personnalités usent de stratégies "plus médiatiques que scientifiques" pour décrédibiliser des alertes scientifiques sur des questions environnementales et/ou sanitaires. Les études de cas exposées dans *Merchants of doubt*, toutes centrées sur les Etats-Unis, sont les pluies acides (Chapitre 3), la destruction anthropique de l'ozone (Chapitre 4), le tabagisme passif (Chapitre 5) et le changement climatique (Chapitre 6). L'étude de cas la mieux documentée, et aussi la plus propre aux auteurs de l'ouvrage, est le changement climatique.

Oreskes et Conway consacrent une douzaine de pages seulement aux controverses états-uniennes sur l'ozone dans les années 1970. Ils écartent toute possibilité que Lovelock se soit jamais trouvé dans une position de conflit d'intérêt avec l'industrie, alors pourtant qu'il a été financé par DuPont. En revanche, ils accusent Scorer d'avoir généré « une presse pro-industrie ». Ils ne précisent pas, toutefois, quelles étaient les intentions personnelles de Scorer lorsqu'il vint aux Etats-Unis début 1975, sous financement de la 'Chemical Specialties Manufacturer's Association', pour dénoncer l'hypothèse Molina-Rowland. Toutefois, précisons-nous, Oreskes et Conway ne désignent pas Scorer comme un « marchand de doute », ce terme étant réservé à des chercheurs ayant mené un travail de sape sur le long terme, par le biais des campagnes multiples contre les lanceurs d'alertes scientifiques sur des questions environnementales et/ou sanitaires [Oreskes & Conway, 2010, pp. 107-118].

Scorer oppose les valeurs de ses pairs météorologistes aux valeurs des chimistes qui ont lancé l'alerte

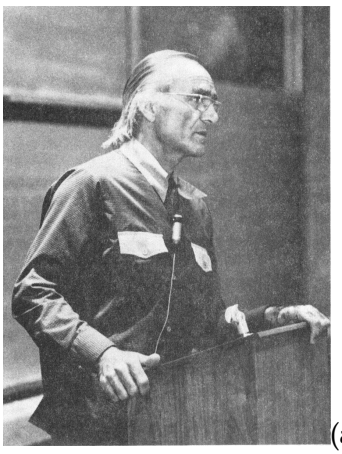
Au cours de l'année 1975, c'est-à-dire dans la foulée de la publication de Molina & Rowland, 1974 et de l'audition de l'expert Rowland par le Sous-comité de la Santé publique et de l'Environnement de la Chambre des Représentants états-unienne, le météorologiste anglais Richard Scorer formule à plusieurs reprises des objections contre les théories de la destruction anthropique de l'ozone. Il le fait par le bais d'entretiens donnés à des journalistes (début 1975), dans un article du journal de vulgarisation scientifique *New Scientist* (juin 1975), ainsi que dans le cadre de journées de travail entre scientifiques de l'atmosphère (été 1975). Puis, en 1976, il publie un « commentaire » de trois pages « sur les théories de la destruction de l'ozone », dans le journal scientifique *Atmospheric Environment* (Scorer, 1976 (1)). Ce commentaire lui vaut une « réponse » critique d'A.J. Broderick (du 'Department of Transportation', l'organisme co-responsable du CIAP avec la NAS, rappelons-le), à laquelle il réplique dans le même numéro (Scorer, 1976 (2)). En 1977, enfin, Scorer se fend d'une « lettre aux rédacteurs en chef » d'*Atmospheric Environment*, intitulée « la stabilité de l'ozone stratosphérique et son importance » (Scorer, 1977 (3)), puis propose à la même revue une recension du « rapport du comité sur les impacts du changement stratosphérique » (Scorer, 1977 (2)).

Disons-le tout de suite : les raisons pour lesquelles Scorer se lance dans une dénonciation de l'emballement médiatico-scientifico-politique autour de la question de l'ozone sont autant politiques qu'épistémologiques (si l'on considère que l'on puisse dans ce cas, en première approximation, dissocier les deux). Pour comprendre les priorités qu'il souhaiterait voir données à la recherche scientifique, et la manière dont il aimerait que soit communiquée l'expertise des scientifiques, il faut savoir "d'où il parle" précisément. Mais, avant de caractériser précisément l'idéologie de Scorer, et comment elle trouve ses relais et ses limites dans le contexte des années 1970 (voir Sous-chapitre 5.3), nous exposons les objections "scientifiques 'strico sensu'" que le scientifique de l'atmosphère fait à ses pairs (nous voulons dire : des objections qui participent d'un type de discours reconnu comme "scientifique" par le lectorat de la littérature des sciences de la nature avec comité de lecture). De nombreuses objections sont identiques à celles utilisées par les industriels, dont nous avons donné quelques exemples dans le chapitre précédent. Il ne s'agit pas pour nous de les exposer dans le détail. En revanche, cette "critique scientifique" du météorologiste "de terrain" Richard Scorer a retenu notre attention, car elle se déploie explicitement en matière d'*opposition entre communautés disciplinaires*, et complète ainsi le tableau que nous initions dans le Chapitre 4 avec les chimistes, et que nous achevons de remplir dans le Chapitre 6 avec les aéronomes et physiciens des atmosphères planétaires. Scorer oppose en effet, dans

leurs valeurs et leurs pratiques, la science de l'ozone des chimistes, faite en laboratoire ou devant un ordinateur, à sa science météorologique, plus proche du "terrain" (*i.e.* de l'objet atmosphère) et empreinte de sagesse.

En juillet 1975, Richard Scorer répond à l'invitation du NCAR (voir Figure 30 (a)). Son exposé doit justifier les objections qu'il a faites à la science de la destruction anthropique de l'ozone stratosphérique, qui ont été diffusées pour certaines par des journalistes états-uniens au début de l'année 1975, puis que Scorer a exposées dans un article publié par *New Scientist* le 26 juin 1975. Au cours de la discussion collégiale qui suivit son exposé, rapporte le journal interne du NCAR du 1er août 1975, Stephen Schneider (voir Figure 30 (b)), jeune chercheur du 'Climate Project' (en passe de devenir une figure importante de la science du changement climatique)[282], « demanda à Scorer pourquoi il croyait que les incertitudes dans les calculs sur la destruction d'ozone signifiaient selon lui que les calculs devaient surestimer l'effet. » Scorer lui aurait répondu que « sa plus grande objection concernait le manque de soin ('the sloppiness') de la connexion postulée entre les diminutions de l'ozone et les dommages biologiques sur le vivant ('biological damage to life'). Il était particulièrement critique au sujet de l'étude de physiciens reliant la destruction d'ozone à une fréquence accrue des cancers de la peau » [Scorer, 1975 **in** *NCAR*, 1975, p. 5]. Impossible de savoir à quels « physiciens » Scorer fait allusion ; mais, cette citation témoigne une première fois du fait que le météorologiste est soucieux de spécifier à quelle communauté disciplinaire appartiennent les acteurs dont il parle, et d'insister sur les inévitables limites de leurs savoirs.

[282] Tôt dans sa carrière, les travaux de Stephen Schneider ont cherché à montrer la réalité d'un changement climatique global d'origine anthropique. Alors post-doctorant au 'Goddard Institute for Space Studies' de la NASA, Schneider publie en 1971 un article abondamment cité, "Atmospheric Carbon Dioxide and Aerosols: Effects of Large Increases on Global Climate", avec S.I. Rasool (*Science* 173, pp. 138-141), qui alarme sur un risque de *refroidissement* rapide de l'atmosphère, dû aux émissions anthropiques d'aérosol. Mais, reconsidérant le rôle du CO_2, il adopte une position agnostique à la fin des années 1970, ne sachant plus s'il faut s'attendre à un refroidissement ou à un réchauffement, avant de se ranger derrière la théorie, devenue plus consensuelle, d'un *réchauffement* climatique, dans les années 1980. Arrivé en 1972 au NCAR comme post-doctorant, Schneider y co-fonde le 'Climatic Project' en 1975. En 1977, il crée le journal *Climatic Change*. Stephen Schneider est mort en 2010. Son poids politique (il sera conseiller des présidents Nixon et Obama) et scientifique – d'expert ou de contradicteur (il sera actif dans les débats controversés sur le CC, mais aussi sur l'hypothèse Gaïa et la géoingénierie) –, ont peu d'équivalents dans la communauté scientifique du changement climatique.


(a)

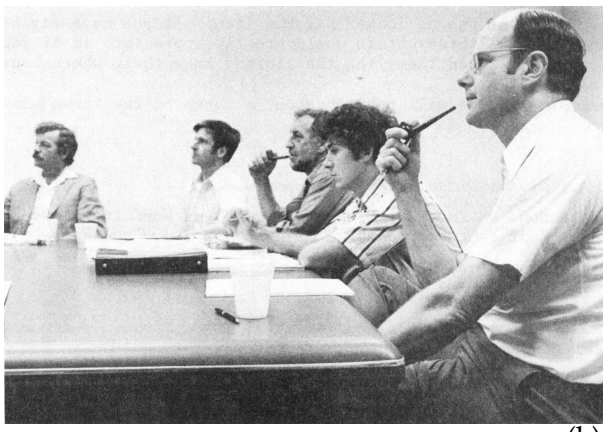

(b)

Figure 30 : (a) Richard Scorer, le 25 juillet 1975, au NCAR (Boulder), et (b) Stephen Schneider (le deuxième individu en partant de la droite), lors d'une réunion du 'Climate Project Advisory Committee' (entre le 21 et le 23 juillet 1975)
[NCAR, 1975, pp. 4 & 7]

Dans son article sur l'ozone paru en juin 1975 dans *New Scientist*, Scorer souligne l'existence de rétroactions multiples entre composition chimique et dynamique atmosphérique. En outre, il met en garde contre le biais qu'induisent des études focalisées exclusivement sur les activités anthropiques – « c'est typique de la pensée humaine, que de rechercher une cause humaine à des évènements qui affectent, ou pourraient affecter, l'homme », fait-il remarquer [Scorer, 1975, p. 702]. Pour finir, Scorer questionne la possibilité que les émissions humaines de composés chimiques, beaucoup plus faibles que les émissions naturelles, puissent avoir quelque impact sur la stratosphère. Mais, s'il appelle toute la communauté scientifique à la prudence, Scorer entend surtout "*recadrer*" *ces chimistes nouvellement venus à l'étude de la stratosphère* pour lancer des alertes catastrophistes qu'il juge peu crédibles. Car, si Scorer a, au cours de sa carrière, consacré une grande partie de son travail aux pollutions de l'atmosphère (il a même été le rédacteur en chef de l'*International Journal of Air Pollution*), il l'a fait, non en chimiste, mais en *météorologiste des pollutions de l'air*. En tant que spécialiste des pollutions de l'air, il admet nécessairement que l'atmosphère "est, effectivement", chimiquement réactive. Mais, Scorer s'intéresse principalement au transport des polluants et à la formation des nuages. Le titre de ses ouvrages – *Natural Aerodynamics* (1956), *Environmental Aerodynamics* (1978), *Air Pollution Meteorology* (2002) – marque clairement son appartenance *à la tradition des météorologistes, et non des chimistes*.

Au milieu des années 1970, nous nous situons au sortir de l'âge d'or de la littérature sur la modification du temps et du climat, indissociable du contexte belligérant des années 1940-60 (voir Chapitre 2). Or, aux yeux de Scorer, la leçon à tirer des échecs répétés de cette tradition est que la prédiction en sciences de l'atmosphère est des plus incertaines. « D'énormes

sommes d'argent ont été dépensées dans la recherche sur la pluie artificielle ('rainmaking research'), et même sur la pluie artificielle elle-même [(*i.e.* par le biais d'expériences de terrain)], par ceux qui ne peuvent attendre », déplore Scorer dans son article pour le *New Scientist*. Cependant, jamais plus qu'une influence insignifiante sur le temps n'a été constatée. » Il ajoute :

> « A l'exception de la médecine peut-être, la météorologie est le champ dans lequel [la] pensée de type science-fiction est la plus mise en pratique [lorsqu'il s'agit de discuter les liens entre activité humaine et altération environnementale... Donnons un autre exemple :] je ne saurais me ranger à l'idée populaire qui soutient que l'on peut augmenter les précipitations en plantant quelque nouvelle végétation. » [Scorer, 1975, p. 702]

La « pensée de type science fiction » n'est donc pas propre aux récits populaires, mais se cache également dans la médecine, et dans la météorologie (Scorer emploie ici le terme 'meteorology' dans son ancienne acception de la première moitié du XX^{ème} siècle, pour désigner "la science de l'atmosphère" de manière générale).

Selon Scorer, les résultats des modélisations de l'atmosphère, notamment, et en particulier celles obtenues par modélisation numérique, sont à considérer avec la plus grande prudence, et doivent faire l'objet d'un examen critique urgent. D'abord, parce que leurs formalismes mathématiques sont très imparfaits. Ensuite, parce que toute modélisation s'appuie sur des données de laboratoires, elles aussi très contestables dans le cas présent, affirme Scorer. Le laboratoire n'est pas l'atmosphère, n'en déplaise aux chimistes qui ont tour à tour alerté sur les risques environnementaux des SST puis des CFC, en affirmant que deux « des éléments les plus communs et aux caractéristiques les plus cycliques dans l'environnement (two 'of the most common and plentifully cycled of the elements in the environment'), les NO_x et les éléments chlorés, p[ouvaient] avoir quelque pouvoir de nocivité, s'il[s] étai[ent] placé[s] au mauvais endroit, [même] en petite quantité ». Le météorologiste britannique doute fortement du pouvoir de nocivité d'espèces chimiques en très faible concentration dans l'atmosphère, et du fait que la composition de la stratosphère puisse être aussi « simple » que ne le prétendent les « chimistes » – et donc, pour finir, que la couche d'ozone soit aussi aisément vulnérable qu'ils ne le pensent. [Scorer, 1975, p. 702]

A ce stade de son article, Scorer décide de *rendre homologique l'opposition "pragmatique" des bonnes pratiques des météorologistes* vs *les mauvaises pratiques des chimistes,* et *l'opposition entre leurs éthiques respectives*. Dans une tirade aux accents nietzschéens (*cf.* l'usage des termes « ressentiment », « instincts »), Scorer dessine le « gouffre philosophique » qui sépare, selon lui, des chimistes tels que ceux qui ont lancé les alertes sur les SST puis les CFC, dont la

vision relève de l'« outrecuidance ridicule » ('preposterous presumptuousness'), et des météorologistes, « scientifiques matures » et empreints de « sagesse » :

> « Ceux [, *i.e.* les chimistes-lanceurs d'alerte,] qui avan[çaient] que la destruction de l'ozone par les SST [était établie] ne se rend[aient] probablement pas compte de l'outrecuidance ridicule de cet avis. Pour eux, dire que les NO_x [des SST] étaient dangereux [constituait] une avancée significative par rapport à la position précédente. »

Quant à l'« outrecuidance » des chimistes-lanceurs d'alerte sur les CFC, elle serait plus grande encore, dans la mesure où cette « dernière peur en date, concernant les fluorocarbures, est plus subtile ('subtle') puisqu'elle concerne le chlore. » Or, ce composé est « rare dans l'atmosphère, car il est très réactif et facilement lessivé [par les précipitations…] Pourtant, s'indigne Scorer, on nous dit à nouveau que l'un des éléments les plus communs et aux caractéristiques les plus cycliques dans l'environnement peut avoir un pouvoir de nocivité, s'il est placé au mauvais endroit, [même] en petite quantité » [Scorer, 1975, p. 703].[283] Et Scorer de conclure, désabusé :

> « Il est difficile de combler le gouffre philosophique ('philosophical gulf') qui sépare [les chimistes lanceurs d'alerte à la destruction anthropique de l'ozone] de beaucoup de scientifiques mûrs, en particulier des météorologistes. »

Or, la chimie et la météorologie peuvent être des sciences d'expertise. Aussi, existe-t-il un corollaire important à l'opposition que formule Scorer : le choix d'une science jeune ou d'une science mûre comme science d'expertise peut correspondre à un choix politique et culturel, qui privilégie, soit les prises de décision urgentes sur la base d'une peur agitée dans les médias, soit des prises de décision réfléchies :

> « Ce dont nous avons besoin, c'est une philosophie qui ne soit pas bouleversée par le dernier flash d'information, apte à prendre les nouvelles découvertes dans sa foulée ('and which can take new discoveries in its stride') [...] Il y aura très probablement des faits nouveaux élucidés au sujet du chlore dans la stratosphère au cours des prochaines années ; mais, plus important que les connaître, est de

[283] Scorer parle des FC (fluorocarbures) en général, mais désigne sans nul doute possible les CFC (chlorofluorocarbures) en particulier. Si ses instincts le conduisent à contredire les résultats de Lovelock, qui décrit les CFC comme s'accumulant dans l'atmosphère sans réagir chimiquement ni être significativement lessivés, c'est parce qu'il traite les CFC comme les composés chlorés atmosphériques qu'il a jusqu'alors rencontrés dans ses travaux sur l'atmosphère. Or, précisément, le point de Lovelock, Rowland, Molina, *etc.* est de faire des CFC des chlores particuliers, chimiquement inertes dans la troposphère et faiblement lessivés. Dans le cadre du Protocole de Montréal, les CFC ne seront-ils pas remplacés par d'autres composés chlorés, les HCFC (hydrochlorofluorocarbures) – qui seront en revanche quant à eux moins stables, plus réactifs (donc en grande partie neutralisés) dans la troposphère –, ce qui témoigne de la spécificité des CFC au-delà de leur simple appartenance à la famille des composés chlorés ?... Dans ses articles de 1976 et 1977 dans *Atmospheric Environment*, Scorer ne réitérera pas cet argument sur le caractère prétendument « très réactif et facilement lessivé » des CFC. [Scorer, 1976 (1&2) & 1977 (2&3)]

> posséder une philosophie sûre à propos de l'environnement, qui mettra fin à la prise de décisions importantes sur la base de peurs ('but more important than knowing them is to have a confident philosophy about the environment which will stop important decisions being made on the basis of the jitters'). » [Scorer, 1975, p. 703]

Selon Scorer, la césure axiologique entre chimistes de l'atmosphère et météorologistes s'explique donc, d'une part, par l'opposition *science jeune et impudente / science ancienne et sage*. D'autre part, chimie de l'atmosphère et météorologie des pollutions s'opposent en tant qu'elles seraient respectivement une *science de laboratoire* et une *science de terrain*. Scorer écrit :

> « Le monde, l'atmosphère, et nous-mêmes sommes infiniment compliqués ('infinitely complicated'), trop compliqués pour n'être jamais pleinement compris par nous. Contrairement à la science de laboratoire qui simplifie la pensée en clarifiant les mécanismes ('simplifies thought by elucidating mechanisms' (*sic*)), la science de plein air ('outdoor science') devient plus compliquée au fil des nouvelles observations. » [Scorer, 1975, p. 703]

« Attirer l'attention sur le fossé ('divide') en les nommant scientifiques « de laboratoire » par opposition à scientifiques « de plein air » entrave la communication », poursuit Scorer, provocateur, qui ajoute : « il semble que cela crée un ressentiment, de signaler que des gens très intelligents puissent prononcer des sottises ('very clever people can utter foolishness'), et que la sagesse puisse provenir d'instincts qui sont la création de nombreux milliers d'années d'évolution » [Scorer, 1975, p. 703]. Les météorologistes seraient-ils donc à présent à placer du côté du "bon sens populaire" ? La météorologie du XX^{ème} siècle aurait-elle des origines antiques ?...

Quoiqu'il en soit, Scorer oppose une science ancienne et de terrain, la sienne, la météorologie, à une science nouvelle et très liée aux études en laboratoire, la chimie atmosphérique. Les historiens des sciences sont fréquemment revenus sur l'opposition "science de terrain/science de laboratoire". Frederik Nebeker a montré comment le « partage des données » météorologiques était une norme ancrée dans les pratiques des savants avant même le XIX^{ème} siècle. La « mise en commun des données atmosphériques ('communality of [atmospheric] data') », écrit par ailleurs Paul Edwards, fit de la météorologie et de la climatologie des traditions scientifiques très différentes des « sciences de laboratoire ('laboratory or "bench" sciences') ». A partir du XIX^{ème} siècle, la météorologie s'est subséquemment « répandue à travers un grand espace géographique, distribuant son réseau de gens, ses instruments et ses connaissances » [Edwards, 2010, pp. 32-34 ; voir aussi Locher, 2008]. A l'inverse, aux yeux de Scorer, les chimistes des pollutions de l'air seraient éloignés de l'atmosphère "réelle", car demeureraient trop souvent confinés dans leurs laboratoires.

Résister aux sirènes de la modélisation numérique

La critique de Richard Scorer ne porte pas exclusivement sur le manque de relevés de terrain dont disposent les théoriciens de la destruction anthropique de l'ozone. La principale cible de Scorer est la modélisation numérique des chimistes, incapable selon lui d'offrir une représentation convenable de l'atmosphère. Non seulement les mesures de terrain seraient insuffisantes pour garantir la qualité des simulations sur l'ozone, argue Scorer, mais les pratiques de modélisation posent également problème.

Les modèles bousculent les pratiques des atmosphériciens

Lors de son intervention au NCAR, en juillet 1975, Scorer avait particulièrement insisté sur les incertitudes qui planaient sur la modélisation de la dynamique atmosphérique, champ d'étude dont il pouvait se présenter comme un spécialiste reconnu. Le journal interne du NCAR du 1er août 1975 rapporte son jugement sur ce point dans les termes suivants :

> « Scorer, qui a fait un certain nombre de déclarations publiques minimisant le problème d'une possible destruction de l'ozone due aux chlorofluorométhanes et mettant en doute les arguments jusqu'alors présentés par la communauté scientifique, a brièvement traité le sujet dans son intervention. Il a argué que les mécanismes de transport atmosphérique pour ces substances n'avaient pas encore été représentés avec précision. Parce que la résolution informatique des équations physiques est tellement redoutable ('formidable'), a-t-il dit, « nous en serons toujours au stade des tâtonnements » dans dix ans » ('in ten years "we'll still be groping"'). » [Scorer, 1975 **in** *NCAR*, 1975, p. 5]

Dans ces articles des années 1970, Scorer insiste à de maintes reprises sur le faiblesse de la représentation du transport atmosphérique – c'est-à-dire, de la météorologie ! – par les modèles de chimie-transport. Et pour cause : comme nous verrons, ces modèles sont dans leur immense majorité des modèles à une seule dimension, c'est-à-dire qui modélisent uniquement les transports verticaux. Ailleurs, Scorer critique plus généralement l'usage que les chimistes de l'atmosphère font des modèles numériques, aussi bien dans la partie physique (*i.e.* dynamique) que dans la partie chimique des modèles. Et, dans certaines communications de 1975 et, vingt-deux ans plus tard, dans son ouvrage *Dynamics of Meteorology and Climate* (1997), le météorologiste s'en prend nommément à Rowland et Molina.

Aux yeux de Scorer, l'opposition entre modélisateurs (numériques) et scientifiques de terrain (qui "collectent" des données) est presque sociologiquement équivalente à l'opposition entre scientifiques de laboratoire et scientifiques de terrain. Les chimistes seraient donc en définitive doublement éloignés de l'atmosphère réelle : non seulement parce

qu'ils manipulent une atmosphère fictive, idéalisée dans le laboratoire, mais également parce qu'ils font un usage, jugé imprudent, des modélisations numériques. Certes, les chimistes de l'atmosphère ont conscience du fait que l'activité de modélisation numérique de l'atmosphère est, pour eux comme pour tout scientifique de l'atmosphère, inconcevable sans une activité parallèle de prise de données standardisées de qualité. Comme les météorologistes et les climatologues, les chimistes de l'atmosphère tiennent en grande estime « les collecteurs, "nettoyeurs" et archivistes de données », comme les nomment P. Edwards [Edwards, 2010, p. 34]. Il n'en demeure pas moins, aux yeux de Scorer, que les chimistes de l'ozone accordent une confiance *beaucoup trop* importante à leurs simulations numériques, dans leurs aspects physiques et chimiques, alors que la tradition des modèles de chimie-transport est très récente (voir Sous-section suivante).

Comme en témoignent ses écrits des années 1970, Scorer s'inquiète, plus généralement, de l'importance qu'est en train de prendre la modélisation numérique dans la recherche atmosphérique.

Dans les années 1960-70, la modélisation informatique bouscule violemment les pratiques et valeurs des scientifiques de l'atmosphère. Dans son ouvrage *A Vast Machine. Computer Models, Climate Data, and the Politics of Global Warming*, Paul Edwards a montré que, sous l'impulsion notamment des programmes chapeautés par les incontournables Carl-Gustav Rossby, John von Neumann et Jule Charney, des météorologistes théoriciens et des programmateurs informatiques avaient acquis un pouvoir d'expert supérieur aux météorologistes et climatologues "traditionnels". La concentration de ressources informatiques dans quelques institutions, pour la plupart états-uniennes, a probablement « plus affecté la climatologie [et les sciences de l'atmosphère] que tout autre champ, écrit P. Edwards. Dans les années 1960 et 1970, ce[s] champ[s] descriptif[s] conduits par les données ('data-driven') et orienté[s] vers les questions régionales [ont été] transformé[s] en [des] discipline[s] conduites par la théorie ('data-driven') et orientée[s] vers les questions globales. » [Edwards, 2010, p. 139 ; complété avec Guillemot, 2007(a)]

Or, ce changement, précise l'historien, avait été « provoqué, non par des climatologues traditionnels, mais par des scientifiques rompus à la météorologie théorique et à la programmation informatique, qui travaillaient au sein d'une poignée d'institutions dotées d'immenses ressources informatiques » [Edwards, 2010, p. 139]. Ainsi, de la même manière que les météorologistes et climatologues "traditionnels", "de terrain" ont perdu de l'influence au profit des météorologistes théoriciens et des programmateurs informatiques depuis les années 1950, Richard Scorer, météorologiste rompu aux études de terrain, a le sentiment de se voir poussé vers la sortie par une nouvelle génération de spécialistes des pollutions

atmosphériques : des chimistes, pour certains ; et, en tout cas, des hommes de laboratoire et/ou des théoriciens et des modélisateurs (P. Crutzen est ainsi un ingénieur informaticien de formation, devenu un théoricien reconnu à la fin des années 1960 – voir Chapitre 6).

Les pratiques de modélisation de la chimie de l'atmosphère dans les années 1970

Scorer voit dans la pratique des chimistes venus à la science de l'ozone stratosphérique un avatar de science éloignée des contraintes du terrain, une science trop spéculative et trop prompte à croire les prédictions de ses modèles, une science comparable à celle des "faiseurs de pluie" [Scorer, 1975, p. 702]. Nous pourrions lui objecter que les météorologistes, dont les météorologistes des pollutions, font tout autant usage de la modélisation numérique que les chimistes au tournant des années 1970. Or, leurs modélisations, également très imparfaites, sont néanmoins promues auprès des décideurs politiques (pour la prévision météorologique, pour tracer les polluants).

En revanche, deux arguments appellent à se méfier des modèles de chimie-transport des années 1970. D'abord, la puissance des ordinateurs est, à cette époque, beaucoup plus réduite qu'aujourd'hui. Par conséquent, *les compromis réalisés entre modélisation de la dynamique et modélisation des réactions chimiques sont nombreux*, afin d'éviter de conduire les capacités des ordinateurs à saturation, et afin de réduire le temps de calcul à un nombre d'heures raisonnable. En particulier, comme nous l'avons dit, dans les années 1970, les modèles de chimie-transport sont dans la plupart des cas des modèles à une seule dimension, c'est-à-dire des modèles qui modélisent seulement le transport vertical.

Ensuite, il est exact que *la météorologie avait derrière elle une quinzaine d'années de pratiques de modélisation numérique de plus que la chimie atmosphérique*. Dès le début des années 1950, des programmes de modélisation numérique dont le 'Numerical Meteorology Project' avaient vu le jour aux Etats-Unis (dans le cadre de ce projet, l'équipe dirigée par Jule Charney était parvenue à « réaliser par ordinateur une prédiction à 24 heures sur le territoire des États-Unis en moins de douze heures – depuis la collecte des données jusqu'à leur impression en passant par le traitement et les calculs » [Guillemot, 2007, p. 42, d'après Edwards, 2004]. *La chimie atmosphérique ne fut pas le lieu de développements intensifs avant la fin des années 1960*, que ce soit pour la *troposphère* (modèles alors tous *locaux ou régionaux*), sous l'impulsion notamment d'un successeur de Haagen-Smit en Californie, John Seinfeld [Heymann, 2010], ou pour la *haute atmosphère* (modèles *globaux*), développements auxquels participa notamment l'ingénieur informaticien de formation Paul Crutzen, à Stockholm [Crutzen, 1995].

En quoi les pratiques de modélisation de chimie atmosphérique des années 1970 consistent-elles ?[284] Dans un article intitulé "Lumping, testing, tuning: the invention of an artificial chemistry in the atmospheric transport modelling", l'historien des sciences de l'atmosphère & du climat et de la modélisation numérique, Matthias Heymann, a étudié l''Urban Airshed Model' (UAM) de l'équipe de John Seinfeld en Californie, qui fut l'un des premiers modèles numériques couplant dynamique et chimie atmosphérique – modèles dits "de chimie-transport". « Depuis la fin des années 1950, écrit Heymann, la simulation informatique a été utilisée pour l'étude du transport des polluants dans l'atmosphère » ; mais, ce n'est qu'une quinzaine d'années plus tard que les transformations chimiques des polluants atmosphériques furent incluses dans des modèles numériques de formation du smog. Parmi ses pionniers, John Seinfeld imagina une nouvelle procédure de modélisation numérique du smog de Los Angeles au début des années 1970. Elle devait permettre de modéliser les réactions chimiques atmosphériques plus efficacement, c'est-à-dire en réduisant le temps de calcul. Les critiques de Scorer sont concomitantes de ces développements, que M. Heymann présente comme précoces.

Matthias Heymann distingue trois moments dans l'élaboration des équations et autres paramètres pris en compte dans les modélisations numériques, que l'on retrouve presque invariablement dans les travaux des chimistes de la troposphère depuis J. Seinfeld :

- une phase de "*lumping*" (littéralement, « regroupement »), qui permet de réduire le nombre d'équations chimiques. Ce travail est réalisé, soit en minorant l'influence de certaines réactions dans l'atmosphère réelle (ou dans la chambre à smog où l'on crée artificiellement un smog en laboratoire, si l'on entend modéliser ce qui se passe à l'intérieur de la chambre à smog) ; soit en regroupant plusieurs équations en une seule, en assimilant plusieurs composés à un seul, sous prétexte de leur appartenance à une même famille chimique ;
- une phase de "*testing*" (« test »), c'est-à-dire de « comparaison des données mesurées [et] des résultats des simulations », qui intervient *parallèlement à* l'élaboration du modèle (la construction du modèle et les mesures forment un même processus dynamique), et permet de renforcer la confiance accordée dans les modèles… voire, à un certain stade de confiance dans le modèle, de renforcer la confiance dans les mesures. Il faut préciser que, « souvent, les éléments individuels des modèles de

[284] Les pratiques de modélisation n'ont pas été mises au centre de notre travail de thèse, comme a pu le faire Hélène Guillemot au Centre Alexandre Koyré avant moi (Guillemot, 2007 (a)). Nous nous arrêtons toutefois sur elles à plusieurs reprises. En particulier, dans la présente section, dans le Sous-chapitre 7.1 (au sujet de l'apparition de modèles intégrés dans l'expertise sur l'ozone), et dans le Sous-chapitre 8.3, consacré à la chimie atmosphérique dans l'expertise du GIEC.

simulation ne peuvent être testés indépendamment, dans la mesure où seul le résultat global est accessible », quantifiable ;

- une phase de "*tuning*" (« réglage »), qui mène en particulier à l'élaboration de ce que les scientifiques de l'atmosphère appellent des « paramétrisations ». Les paramétrisations sont des expressions mathématiques souvent simples et induites à l'aide d'une argumentation empirique après l'analyse du comportement physique de données collectées lors de diverses campagnes de mesures *in situ*. Elles suppléent aux équations théoriques déterministes lorsqu'il n'est pas possible de les élaborer à l'échelle de la maille du modèle, mais seulement à une échelle inférieure.[285] [Heymann, 2010, p. 219 & 223-230]

Ces trois phases de 'lumping'/'testing'/'tuning' se sont en outre imposées dans les pratiques de modélisation de la *stratosphère* à la même époque que les développements de l''Urban Airshed Model' (UAM). Là encore, comme dans la plupart des champs de la chimie de l'atmosphère jusqu'aux années 1980, il semble que les communautés de la stratosphère et de la troposphère aient rarement échangé afin de développer leurs modèles numériques respectifs. Quoiqu'il en soit, à partir du tournant des années 1980, les trois pratiques d'élaboration des modèles décrites par M. Heymann sont présentes, de manière routinière, à la fois dans les travaux des chimistes de la pollution troposphérique et des chimistes de la pollution stratosphérique.[286]

---

[285] Cette technique de paramétrisation s'est imposée dans la presque totalité des modélisations de l'atmosphère. Prenons l'exemple des modèles de circulation générale. Le modélisateur du Laboratoire de Météorologie Dynamique (LMD ; Paris), Frédéric Hourdin, écrit :

> « L'objet d'une paramétrisation physique est de représenter l'impact d'un processus particulier sur l'évolution temporelle des variables d'état du modèle, à savoir les valeurs moyennes de la température, de l'humidité ou du vent. Cette paramétrisation repose sur une description approximative des caractéristiques moyennes de ce processus au sein d'une colonne du modèle. Cette description fait intervenir de nouvelles équations mathématiques qui font elles-mêmes intervenir de nouvelles variables internes à la paramétrisation, qui caractérisent l'état du processus : intensité de la turbulence dans une maille du modèle, fraction de la maille couverte par des nuages. Ces équations ne décrivent pas l'état de chacun des nuages contenus à l'intérieur de la maille mais visent à rendre compte des propriétés moyennes ou statistiques de ces processus. On fait alors l'hypothèse qu'au sein d'une maille du modèle, les propriétés statistiques du processus considéré ne varient pas horizontalement. Par conséquent, les processus n'auront pas d'effet sur les transferts horizontaux. Les paramétrisations rendent donc uniquement compte de transferts verticaux d'énergie, de quantité de mouvement ou de constituants entre les mailles ou couches du mille-feuille. L'effet de ces transferts verticaux est introduit sous forme de forçages additionnels dans les équations du modèle global.
>
> « Ces paramétrisations sont bâties à la fois sur une connaissance phénoménologique des processus en question, sur certains principes de base de la physique, parfois mais plus rarement sur une théorie statistique permettant un fondement plus solide. » [Hourdin, pp. 150-151]

Remarque : « Phénoménologique » ne renvoie bien sûr pas ici à la tradition philosophique post-husserlienne, mais caractérise un type de connaissance propre aux sciences de la nature, qui fait tenir ensemble de nombreuses observations empiriques, de telle façon que cette connaissance soit en accord avec la théorie fondamentale, sans pour autant en être issu, ni même pouvoir s'insérer en elle en l'état. Sur le sujet, voir par exemple Cartwright, 1983.

[286] On retrouve par exemple implicitement les méthodes de 'lumping', testing' et 'tuning' dans les modélisations de l'ozone stratosphérique de Wuebbles, 1983, "Chlorocarbon Emission Scenarios: potential impact on stratospheric ozone". Au début des années 1980, l'acception du terme « paramétrisation » que nous avons donnée, et qui est réservée à la pratique de modélisation numérique, s'est imposée. Dans les modèles de chimie-transport, les paramétrisations portent principalement sur les aspects dynamiques.

Un chimiste de la troposphère et chimiste de formation, Matthias Beekmann,[287] nous expliquait récemment que, dans les laboratoires de ce début de XXI^{ème} siècle, on distingue parfois entre chimistes de laboratoire (dont le rôle premier consiste à élaborer des constantes de réaction pertinentes pour l'atmosphère) et chimistes théoriciens (qui « travaillent sur le papier et l'ordinateur uniquement »). Mais, la division des tâches n'est jamais nette [Beekmann, 2011]. Il semble même qu'elle fût des plus floues dans le cas des chimistes de la troposphère du milieu des années 1970, lorsque Scorer signa son article dans *New Scientist*. Nous n'avons pas cherché à mener une étude sur les pratiques scientifiques précises des Molina, Rowland, gens du CIAP, Scorer, *etc.* dans les années 1970. Nous revenons, pour finir, sur les arguments que Scorer mobilise contre les modélisations qui vont dans le sens d'une destruction anthropique de l'ozone dans les années 1970.

Scorer s'attaque avant tout aux pratiques de modélisation des théoriciens de la destruction anthropique de l'ozone… lorsque ceux-ci « jouent avec entrain "à la" photochimie informatique », comme s'en amuse Halstead Harrison [Harrison, 2003, pp. 13-14]. Certes, Scorer reproche à Rowland et Molina (qu'il vilipende plus que tout autre) leur rhétorique de la peur dans les arènes politiques et médiatiques, entre 1974 et 1978. Le météorologiste suspecte par exemple le « Dr Molina » d'avoir suggéré à un journaliste que « nous serions bientôt 'frits' par les rayons UV-B qui atteindraient la surface de la Terre après destruction de la 'couche d'ozone' » ; avant d'ajouter, quelques lignes plus loin : « les scientifiques sont certainement tentés d'effrayer ceux qui tiennent les cordons de la bourse de la recherche, et de nombreux scientifiques m'ont dit qu'utiliser la peur pour obtenir des financements était de toute évidence une bonne tactique. » [Scorer, 1997, p. 618] Mais, ces lignes sont écrites en 1997, avec un regard biaisé jeté sur le contexte des années 1970. Dans ses écrits des années 1970, Scorer ne dénonce jamais l'appât du gain des recherches sur l'ozone. Scorer entend alors surtout mettre en cause la foi de Molina et Rowland dans leurs modélisations numériques, soit parce que les modélisations numériques sont jugées en elles-mêmes comme des pratiques douteuses, soit parce qu'elles obligent à des choix d'équations et de paramètres aux dépens d'autres (du fait des capacités limitées de calcul des ordinateurs ou par souci de ne pas voir "dévier" les modélisations). Ce que Scorer fait principalement dans la littérature avec comité de lecture.

[287] Matthias Beekmann a suivi une formation de chimiste en Allemagne, avec une maîtrise en France, au cours de laquelle il a fait un stage en chimie de l'atmosphère. Ce dernier lui a donné le goût pour la chimie de l'atmosphère, m'a-t-il confié. Entre 1988 et 1992, il a effectué sa thèse au Service d'Aéronomie. Il travaille aujourd'hui au LISA (Laboratoire Interuniversitaire des Systèmes Atmosphériques), à Créteil, en région parisienne. [Beekmann, 2011, entretien accordé à l'auteur le 26 juillet 2011]

Dans son long ouvrage théorique de 1997, intitulé *Dynamics of Meteorology and Climat*, Scorer prend le temps de revenir sur l'affaire de l'ozone dans les années 1970. Après avoir violemment décrié les modélisateurs des impacts environnementaux des SST au début des années 1970, Scorer s'en prend au modèle de Rowland et Molina. Il est qualifié de « défectueux ('faulty model'), ignorant des branches scientifiques autres » que la chimie [Scorer, 1997, p. 614]. Ce point est essentiel pour Scorer. Dans les deux cas de modélisation (SST et CFC), sa critique des modèles porte principalement sur leur caractère unidimensionnel, qui ne prend donc en compte seulement la dynamique verticale des masses d'air. Les processus d'advection, qui se déploient dans les deux autres dimensions du référentiel atmosphérique, manquent à l'appel. Or, aux yeux du météorologiste Scorer, ces dimensions manquantes sont essentielles pour modéliser efficacement le transport des polluants. Pour lui, décrier les modèles de chimie-transport revient surtout à pointer du doigt *leur dynamique atmosphérique trop simpliste*. Lorsqu'ils ont pris en compte des aspects dynamiques, affirme-t-il, les modélisateurs de la chimie stratosphérique s'en sont jusqu'alors tenus au mieux à des paramétrisations très grossières des mélanges de polluants dans l'atmosphère. Or, une meilleure prise en compte de paramètres de transport et de mélange de polluants pourrait selon Scorer totalement récuser les thèses de destruction de l'ozone par les CFC et SST. [Scorer, 1997, pp. 614-618]

Rétrospectivement, Scorer résumera ainsi la situation de la recherche sur la destruction anthropique de l'ozone par les CFC entre 1974 et 1976 :

> « On a dit que, puisque plusieurs modèles à 'une dimension' faits par des personnes différentes avaient donné des résultats semblables, il existait par conséquent un **consensus** [(c'est Scorer qui souligne, en gras)] à l'intérieur de la communauté scientifique, et les résultats devaient être crus. [Or,] l'accord survint parce que tous les scientifiques avaient utilisé le même modèle (défaillant), et obtenu la même réponse (erronée) *(sic)* ». [Scorer, 1997, p. 614][288]

Fidèle à ses pratiques, Scorer force le trait pour emporter l'adhésion… Par contre, il est exact que, jusqu'à la fin des années 1970, très peu de simulations numériques avaient été réalisées, et pratiquement aucune à 2 et 3 dimensions.

En outre, on pourrait penser que Scorer affirme que les théories des années 1970 étaient fausses *sur la base de la nouvelle science de l'ozone post-1985*. Mais, *il serait injuste de lui faire ce procès en anhistoricité*. Dans les années 1970, Scorer avait cherché à montrer, dans des articles 'peer-reviewed', que si la théorie de la destruction anthropique de l'ozone était bien « la

[288] Pour le détail de la discussion technique, nous renvoyons à Scorer, 1997, pp. 611-616.

meilleure théorie disponible », elle était incomplète. Pour Scorer, dire que la théorie de Molina-Rowland était fausse signifie que l'état des savoirs était tel qu'il était *nécessairement* incapable de conduire aux bonnes conclusions *autrement que de manière fortuite*. Voici le point que Scorer fait dans tous ses articles d'*Atmospheric Environment* consacrés à l'ozone dans les années 1970 : « il [était à cette époque] impossible de prouver que les conclusions [des théories de la destruction de l'ozone par les NO_x ou le chlore fussent] fausses ('wrong') » ; et, « il [était] tout autant impossible de réfuter des conclusions opposées » (les siennes, par exemple, donc)… D'où cette phrase à première vue étonnante, en introduction à son "Commentary on Ozone Depletion Theories" de 1976 :

> « Mon but est de montrer que les théories [qui indiquent un danger de destruction de l'ozone dans l'avenir] sont fausses ('wrong'), mais qu'il est impossible de prouver que leurs conclusions le sont. » [Scorer, 1976 (1), p. 177]

D'après Scorer, la thèse de Molina-Rowland n'était, ni réfutable, ni "confirmable" (donc, elle n'était pas scientifique au sens de Karl Popper). Cette position n'était pas propre à Scorer. Comme nous l'avons dit plus haut, experts du CIAP et scientifiques de DuPont se renvoyèrent au visage le même argument, retourné dans un sens ou dans l'autre : veuillez faire la démonstration qu'une catastrophique destruction anthropique de l'ozone est en cours / est impossible. Comme nous l'expliquons plus bas, Scorer, lui, ne voulait pas entendre parler du principe de précaution, et appelait donc au 'statu quo'.

Nombreux sont les scientifiques de l'atmosphère qui concédèrent les grandes limitations de la modélisation numérique des variations de concentration d'ozone stratosphérique en fonction de l'apport en polluants – soit parce que la théorie chimique était trop simple, soit parce que la dynamique était trop simple, soit parce que les simulations étaient très imparfaitement soutenues par les mesures atmosphériques physiques et chimiques. *Or,* en l'absence de tendances à la baisse observables dans les mesures d'ozone stratosphérique, les alertes sur la destruction anthropique de l'ozone entre 1970 et 1985 *reposaient entièrement sur des modélisations numériques*. Le physicien McElroy, qui avait pourtant publié à partir de 1972 des résultats de modélisation qui indiquaient qu'il fallait selon lui prendre au sérieux la possibilité d'une destruction de l'ozone par les émissions de navettes spatiales, puis qui avait apporté un soutien précoce à l'hypothèse de Molina et Rowland, reconnaissait en 1974 que « la chimie atmosphérique [était] très difficile et [qu']il [était] facile de rater quelque chose ». Dans cet article de 1974, il réclamait en conséquence que « des mesures directes [(*i.e.* dans l'atmosphère) soient] effectuées très rapidement » afin de tester les modèles théoriques et améliorer les modèles numériques [McElroy, 1974 **in** *Science News*, 1974(1), p. 213]… Dans les années 1970, Scorer, pour sa part, demeurait perplexe devant un espoir de progrès des connaissances à court terme.

A ce propos, de manière fort logique, la NASA et la NOAA mettront avant tout en avant leurs capacités à produire une telle "sound science", au cours de la guerre de succession au CIAP en 1975-76 (voir Sous-chapitre 6.2). Une "sound science" alors réclamée à cor et à cri, à la fois par les scientifiques et par les industriels. En revanche, alors que l'attitude de Scorer dans la controverse de l'ozone des années 1970 semble indiquer que Scorer en appelait, lui aussi, "par principe" à une "sound science" de plus en plus puissante, nous verrons dans le Sous-chapitre 5.3 que sa position était toute différente.

La "conversion" de Scorer aux simulations de chimie à la fin des années 1980

La critique de la modélisation numérique de la destruction de l'ozone constitue un leitmotiv dans les écrits de Scorer, du début des années 1970 à la fin des années 1990, alors qu'il publie ses derniers écrits (il a soixante-dix-huit ans lorsque sort son *Dynamics of Meteorology and Climate* en 1997). Mais, ses attaques porteront toujours contre les théoriciens de la catastrophe de l'ozone *d'avant 1985*.

A partir de la fin des années 1980, en effet, Scorer juge que la science de l'ozone est bien meilleure qu'auparavant, que la destruction anthropique de l'ozone est à présent crédible, et même que l'urgence montrée à légiférer est légitime. D'abord, parce que, écrit-il, ont été publiées en 1985 « les premières mesures d'une réduction significative de l'ozone dans la stratosphère[,] la découverte du *trou d'ozone*, comme on l'appelle communément » ; puis, dans le foulée, d'autres preuves de cette réduction, et des démonstrations du lien entre elle et les émissions de CFC [Scorer, 1997, pp. 610-619].[289] Ensuite, parce que des *modèles à deux et trois dimensions* ont été élaborés au cours des années 1980, qui prenaient mieux en compte les aspects dynamiques chers à Scorer. Dernière évolution, que ne relève pas le météorologiste Scorer : le nombre d'équations chimiques pris en compte augmenta inexorablement – même si toutes les équations chimiques pertinentes ne pouvaient être intégrées dans les modèles.[290]

---

[289] Dans le grand rapport international *WMO/*…, 1985, il est écrit qu'aucune tendance « statistiquement significative » ne peut être dégagée des mesures par spectrophotomètres Dobson au sol dans la période 1970-1983, ni des mesures par ballons-sondes, ni des satellites. La menace d'une destruction (globale) d'ozone repose alors sur des modélisations numériques utilisant notamment l'hypothèse de Molina et Rowland. Par contre, ajoutent les experts internationaux, « une preuve récente a été présentée, qui indiquait une diminution considérable de la colonne d'ozone antarctique printanière depuis 1968 » (*cf.* les résultats de Farman et collègues, qui seront publiés courant 1985 dans Farman *et al.*, 1985) [*WMO/*…, pp. 18-21]. Dans la seconde moitié des années 1980, des tendances globales seront publiées. « En 1988, le 'NASA Ozone Trends Panel report' indiquait [par exemple] des mesures de déclin des niveaux d'ozone dans les régions tempérées de l'Hémisphère nord d'environ 1,7 pourcent ± 0,7 pourcent (erreur standard) entre 1969 et 1986, ce qui est juste très légèrement significatif ('which is just marginally significant')) (NASA, 1988, p. 40). » [Christie, 2000, p. 34]. A partir de 1985, les experts de l'ozone mettront principalement l'accent sur la destruction d'ozone en Antarctique et – dans une moindre mesure – en Arctique, qui sont selon eux les principaux lieux de destruction d'ozone. (Voir Chapitre 7)

[290] Guy Brasseur écrivait ainsi en 1987 :

> "Over 192 chemical reactions and 48 photochemical processes are involved in ozone depletion caused by CFCs, but no models reflect all of them." [Brasseur 1987:7 **in** Litfin, 1994, chapter 3, p. 11 of 18]

Comme les modèles précédents, les modèles post-1985 cherchent à calculer des tendances hémisphériques ou globales d'ozone stratosphérique. Les modèles post-1985 calculent les destructions dites du trou de la couche d'ozone, aux pôles, mais également des destructions, jugées beaucoup moins rapides, au niveau des moyennes et basses latitudes.

Tenons-nous en, pour le moment, aux modèles "de première génération", développés entre 1974 et 1985, dans l'ignorance du phénomène de destruction annuelle croissante d'ozone polaire. Sur la base d'entretiens avec des chimistes de l'ozone, Karen Litfin a situé l'essor des modèles numériques de destruction d'ozone par les CFC : les premiers modèles à deux dimensions datent de la fin des années 1970 ; et l'apparition des modèles à trois dimensions, du début des années 1980. « Les premiers modèles du milieu des années 1970, relate-t-elle, étaient [en effet] unidimensionnels, et réalisaient des moyennes d'effets locaux d'une perturbation unique pour ensuite produire une image globale uniforme ('averaging local effects of a single perturbation to yield a uniform global picture') (National Research Council 1976:323D31). » [Litfin, 1994, chapter 3, p. 11 of 18]

Plus tard au cours de la même décennie, des modèles bidimensionnels furent développés pour prendre en compte les distributions latitudinales. « Ces modèles prédisaient d'importantes pertes d'ozone dans la haute stratosphère, car attribuaient un grand crédit à la possibilité d'un changement climatique spectaculaire ('dramatic') inhérent à une destruction [chimique] d'ozone. La plupart des modélisations depuis la fin des années 1970 ont été faites à l'aide de modèles bidimensionnels. » Les premiers modèles tridimensionnels, poursuit Litfin, « ont été développés au début des années 1980. Ils prenaient en compte [alors] les effets turbulents et divisaient la Terre en un maillage » géographique qui combinait donc à présent altitude, latitude et longitude. Toutefois, comme en atteste le grand Rapport international WMO/UNEP/… *Atmospheric Ozone* de 1985, les scientifiques de l'ozone comptaient peu sur les modèles 3-D au milieu des années 1980. Cette tendance perdurera jusqu'aux années 2000, où les résultats des modèles 3D finiront pas être utilisés à peu près autant que ceux des modèles 2D dans les rapports d'expertise internationaux sur l'ozone. Les raisons principales sont : d'une part, la prise en compte beaucoup plus systématique du changement climatique, qui est depuis les années 1990 presque exclusivement modélisé à l'aide de modèles 3D ; d'autre part, bien sûr, l'augmentation des capacités de calculs des ordinateurs.[291] [Litfin, 1994, chapter 3, p. 11 of 18 ; *WMO/…*, 1985, p. 20 ; Christie, 2000, p. 34][292]

[291] Dans son ouvrage de 1994, Karen Litfin expliquait que, « bien qu'ils [fussent] dynamiquement plus sûrs, les modèles [de couche d'ozone] à trois dimensions coût[aient] plus chers à faire tourner, et leur chimie [était] quelque peu plus simpliste, ce qui écart[ait] la possibilité d'une dépendance envers de tels modèles (*cf.* entretien [de Karen Litfin] avec Robert Watson) » [Litfin, 1994, chapter 3, p. 11 of 18]. Seize ans plus tard, le *Scientific Assessment of Ozone Depletion : 2010* attestait la part croissante des modèles 3D dans l'expertise sur la destruction de l'ozone :

Le grand rapport *WMO/…* sur l'ozone de 1985 déroule les principales étapes de l'évolution des modèles numériques de physico-chimie de la stratosphère entre 1974 et 1985, c'est-à-dire avant que la modélisation de l'ozone polaire ne devienne l'enjeu majeur. Il donne, de plus, le détail des protagonistes des modèles. Mais, après avoir proposé une brève explication au fait que les valeurs de destruction d'ozone estimées par les modèles du CIAP, de la NAS, de la NASA, *etc.* et repris dans les rapports de la WMO/UNEP avaient diminué de 15-20% à 3-5% entre 1974 et 1985, les auteurs du rapport préfèrent se focaliser sur les efforts récents réalisés depuis 1981, date du précédent rapport de l'OMM sur l'ozone. « Depuis le rapport OMM de 1981, écrivent les auteurs du « Chapitre 13. Model prédictions of Ozone changes » (parmi lesquels on compte Harold Johnston (co-directeur de rédaction du chapitre), Ralph Cicerone, M. Prather, Susan Solomon, N.D. Sze et Donald Wuebbles), l'accent a été mis sur deux points :

(a) Les prédictions de changements dans la colonne d'ozone comme résultant d'augmentations des CFC, données par les modèles unidimensionnels, sont fortement dépendantes des augmentations d'autres gaz : méthane, oxyde d'azote et dioxyde de carbone. Le méthane et l'oxyde d'azote interagissent chimiquement avec divers processus qui affectent l'ozone. Le dioxyde de carbone, ainsi que les CFC, l'oxyde d'azote et le méthane, sont actifs dans "l'effet de serre", qui (en plus d'augmenter la température de surface) réduit les températures stratosphériques, ralentissant les réactions chimiques qui détruisent l'ozone, et ainsi augmentant l'ozone. » Tant et si bien que, en définitive, les auteurs doivent conclure que « certaines combinaisons de gaz traces en augmentation avec une utilisation continue de CFC mènent à des augmentations de la colonne d'ozone, plutôt qu'à des

---

"The number of available CCMs and CCM sensitivity simulations has significantly increased since the previous Assessment [of 2006]. In contrast to [it], which assessed two- and three-dimensional model simulations of future ozone, this chapter [("Future Ozone and its Impact on Surface UV")] assesses ozone projections from the current generation of three-dimensional CCMs." [*WMO/UNEP/*…, 2011, p. 3.6]

[292] Le récit de l'épistémologue Maureen Christie offre des informations complémentaires au récit de Litfin. Christie relate ainsi l'évolution de la modélisation numérique de la destruction anthropique de l'ozone par les CFC dans les années 1970 :

"Molina's original computer modelling suggested that anthropogenic inputs of inert chlorine compounds may have caused current depletion of about 5 per cent, and would cause eventual depletions around 13 per cent, relative to 'natural' levels. But it had been a one-dimensional model – that is, it had considered variations of concentration only with altitude, and had therefore necessarily taken a very naïve view of circulation factors. Over the following few years, the models were made more sophisticated. Several new discoveries in stratospheric chlorine/ozone chemistry that were made during this period had significant effects on the projections. Most notable was the discovery of the role of chlorine nitrate, $ClONO_2$, as a significant reservoir of stratospheric chlorine. This substance formed in three body collisions involving ClO and NO_2, and thus limited the length of both the chlorine and NO_x catalytic chains. And also during this period enormous strides were made in computer technology, which allowed serious two-dimensional models of both circulation and chemistry to be developed for the first time. This allowed better account to be taken of circulation effects and latitude variations. Predictions of expected amounts of ozone depletion varied widely during the period, but eventually seemed to settle down to a figure around half of Molina's original prediction." [Christie, 2000, p. 34]

diminutions, dans les modèles unidimensionnels » !... Même si cela ne signifie bien sûr pas que toutes les modélisations mènent à ce résultat – puisque le rapport de 1985 réaffirme le risque réel d'une diminution globale de la colonne d'ozone (en cours ou à venir) liée aux émissions de CFC.

(b) Voici pour les modèles 1D. Mais, le début des années 1980 est caractérisé par un effort sans précédent dans le développement des modèles 2D, qui intègrent la dynamique atmosphérique, les menant à des résultats nouveaux. Les auteurs du chapitre écrivent que « certains modèles bidimensionnels prédisent de forts gradients de latitude pour les réductions de la colonne d'ozone en réponse à une augmentation de CFC, dans le sens de plus larges réductions d'ozone dans les régions tempérées et polaires ». C'est que, à l'inverse des modélisations de l'ozone global moyen – et ceci qu'elles soient faites « avec des modèles unidimensionnels ou bidimensionnels » –, les modélisations 2D prenant en compte la dynamique atmosphérique distinguent des réponses de l'ozone au CFC très différentes selon les latitudes. Précisons que, au moment de l'écriture du rapport, les résultats de Farman et collègues, qui avaient mesurés des diminutions drastiques d'ozone en Antarctique (résultats publiés dans Farman *et al.*, 1985), étaient connus des rédacteurs ; les larges réductions d'ozone dans les régions polaires étaient donc devenus des résultats de modélisation très plausibles (elles étaient, en outre, plus aisément "confirmables" par l'expérience que les évolutions des valeurs moyennes). [*WMO/…*, 1985, p. 721][293]

L'entêtement de Lovelock

Dans leur ouvrage *Marchand de doute* (2010), Naomi Oreskes et Erik Conway passent rapidement sur la controverse de l'ozone aux Etats-Unis dans les années 1970. Pour illustrer leur propos, ils désignent, hélas, Richard Scorer comme un chercheur prétendument "environnementalo-sceptique" ayant "roulé sciemment pour" l'industrie. Or, nous verrons dans le Sous-chapitre suivant que l'intention politique de Scorer était tout autre. En outre, Oreskes et Conway sous-entendent que l'activité de Scorer s'est résumée à avoir parlé à un journaliste de média grand public. Or, nous avons signalé que Scorer a également publié dans le journal de vulgarisation *New Scientist* en 1975 (ce que font à la même période Sherwood Rowland et des chercheurs de DuPont), et surtout produit plusieurs articles dans la prestigieuse revue à comité de lecture *Atmospheric Environment*, en 1976 et 1977. Quant aux

[293] Dans le Chapitre 7, nous discuterons deux autres innovations décisives dans la mutation des pratiques de modélisation numérique au sein de l'expertise dominante sur l'ozone (soutenue par l'ONU) au début des années 1980 :

- l'introduction de la notion de *scénario* ;
- la contribution reconnue des modélisateurs de *l'industrie privée* DuPont.

déclarations à l'emporte-pièce qu'aurait faites Scorer aux médias en 1975, Oreskes et Conway ne nous en disent rien. Reconduisant des procédures d'exclusion en vigueur chez les journalistes, ils se contentent d'épouser les impressions de Dotto et Schiff, alors pourtant que ce dernier a participé activement, rappelons-le, à l'expertise de la NAS dans les années 1970. Ils déclarent :

> « La tournée de Scorer visait à générer une presse pro-industrie, et non à apporter une contribution à l'effort scientifique, et après qu'un journaliste du *Los Angeles Times* eut mis au jour son lien avec le lobby industriel [en janvier 1975], le désignant comme un mercenaire ('scientific hired gun')[294], [Scorer] perdit toute efficacité en matière de relations publiques ('he lost whatever PR effectiveness he had'). » [Oreskes & Conway, 2010, p. 114]

Et Scorer de « quitt[er] la scène », décrédibilisé… Mais, aux yeux de qui avait-il été décrédibilisé, dans quelle arène ? Certes, après cette révélation sur le financement reçu par Scorer, celui-ci perdit sa crédibilité médiatique. Mais, au cours de l'été suivant, nous l'avons dit plus haut, le météorologiste fut reçu cordialement au NCAR, puis il continua de publier des articles, recensions ou commentaires sur la science de la destruction de l'ozone stratosphérique dans une importante revue à comité de lecture des sciences de l'atmosphère, *Atmospheric Environment* (Scorer, 1976 (1), Scorer, 1976 (2); Scorer, 1977 (2), Scorer, 1977 (3)). Les scientifiques de l'atmosphère ne pensaient donc pas que les objections scientifiques de Scorer fussent ridicules.

Nous nous étonnons d'autant plus de voir Scorer isolé par Oreskes et Conway comme unique scientifique de la recherche publique ayant "roulé pour l'industrie" que, dans le même temps, James Lovelock passe entre les mailles de leur filet (*cf.* Oreskes & Conway, 2010, « chapitre 4 » sur l'ozone, pp. 112-135). Certes, le financement par DuPont pendant quelques mois de ce chimiste de formation, ex-NASA et auteur de l'hypothèse d'une accumulation des CFC dans l'atmosphère à l'échelle globale (communications et articles datant de la fin des années 1960 et du début des années 1970), n'en fait évidemment pas *ipso facto* un défenseur de l'industrie des CFC… D'autant moins que ce contrat précède l'alerte de Molina-Rowland.[295] Mais, si l'on observe les discours que tint Lovelock sur la

[294] « Tueur à gages » est une autre traduction possible de 'hired gun', plus littérale, mais qui ne convient guère étant donné la nature de l'évènement.

[295] Au début des années 1970, son contrat à la NASA étant arrivé à son terme, Lovelock peut accepter la proposition de DuPont, qui lui permettait de prolonger quelque peu ses études sur les CFC. Dans cette époque prospère de la recherche publique (états-unienne comme britannique), Lovelock ne peinait nullement à trouver de nouvelles sources de financements. Il faut plutôt comprendre son contrat chez DuPont en lien avec la posture d'indépendance vis-à-vis de la recherche académique qu'il affirma très tôt, avant même de tirer des revenus importants de ses ouvrages sur Gaïa, à partir des années 1990. L'auteur de l'article "the Quest for Gaia", publié le 6 février 1975 (cosigné par Sidney Epton (Shell's Thornton Research Centre), est présenté ainsi, laconiquement par l'éditeur (le journal de vulgarisation scientifique *New Scientist* :

science de l'ozone stratosphérique à partir de 1974, on s'étonne de l'acharnement dont il fit preuve contre elle, et de surcroît bien au-delà de 1974-76, comme en témoignent ses ouvrages sur Gaia…[296] Il est, en outre, erroné de décrire l'activité scientifique de Lovelock à partir des années 1970 comme une entreprise *solitaire* d'écrivain dévolue à Gaïa. Lovelock s'est beaucoup exprimé dans les médias depuis les années 1970, pour faire valoir ses "solutions politiques" à la crise environnementale (parmi lesquelles, des méthodes très controversées telles que le contrôle des naissances, l'énergie nucléaire (jusqu'à oser publier en 2004 un article sous le titre "Nuclear power is the only green solution", dans le quotidien britannique *The Independent* [*Lovelock's official website*, 2014, "articles" *The Independent*, 24 May 2004]), et la géoingénierie pour contrebalancer le changement climatique [Lovelock, 2008]). De plus, ses ouvrages Gaia sont eux-mêmes, par endroits, des manifestes politiques.

Au lendemain des premières réglementations sur les CFC aux Etats-Unis, le chimiste anglais écrit, dans son premier ouvrage dédié à Gaia (*Gaia, A new look at life on earth*, publié en 1979 puis réédité en 1987, 1995 et 2000) :

> En 1975, « existait en Amérique une inquiétude étrange et disproportionnée au sujet de l'ozone stratosphérique. Elle s'avérera peut-être visionnaire au bout du compte, mais elle était alors une spéculation basée sur de très fragiles preuves ('speculation based on very tenuous evidence'), et le demeure. »

Et d'ajouter, un peu plus loin, en "réponse" aux « mises en gardes de nombreux environnementalistes [qui pensent] que la pire catastrophe qui menace à présent notre monde est la destruction de couche d'ozone dans la stratosphère par les avions supersoniques ou les produits des bombes aérosols » :

> « Les oxydes d'azote détruisent effectivement l'ozone ; mais, en fait, la nature s'occupe de détruire la couche d'ozone depuis très, très longtemps [(comprendre : elle a, au cours des âges, trouvé un ou des équilibres entre destruction et genèse d'ozone ; *notre ajout*)]. Trop d'ozone peut être aussi mauvais que trop peu. Comme tout le reste dans l'atmosphère, il existe des optima désirables. La couche d'ozone pourrait augmenter jusqu'à 15 pourcent. Autant que nous sachions, plus d'ozone

"Dr James Lovelock FRS is at Bowerchalke, near Salisbury" [Lovelock & Epton, 1975, p. 304].
Néanmoins, aussi « indépendant » qu'il se postule, J. Lovelock n'a pas refusé de coopérer au système méritocratique. Il a intégré plusieurs prestigieuses institutions méta-universitaires (dont la 'Royal Society'). En outre, il a accepté les nombreux honneurs qui lui ont été proposés par des organismes publics ou privés (Tswett Medal (1975), American Chemical Society chromatography Award (1980), World Meteorological Organization Norbert Gerbier Prize (1988), Dr A.H. Heineken Prize for the Environment (1990), Royal Geographical Society Discovery Lifetime Award (2001), Wollaston Medal of the Geological Society (2006)).

[296] D'après la journaliste Sharon Roan (source sujette à caution), la virulence des propos de Lovelock *dans les médias* en 1974-75 n'avait même rien à envier aux scientifiques de l'industrie des CFC. Voir l'exemple tiré de Roan, 1989, cité dans la note n°18 du présent chapitre.

> pourrait être indésirable climatiquement. [... Si] trop d'ultra-violet pourrait vouloir dire : cancer de la peau, trop peu signifie très probablement : rachitisme. Bien que nous ne puissions attendre de bénéfices globaux particuliers pour nous en tant qu'espèce [...,] de faibles niveaux d'ultra-violets pourraient être bénéfiques à d'autres espèces, d'une manière que nous ne connaissons pas encore. [Face à des variations de flux d'UV, u]ne machine régulatrice ('a regulating device') semblerait tout de même utile, et l'oxyde d'azote, ainsi que d'autres gaz atmosphériques d'origine biologique récemment découverts, et le chlorure de méthyle, pourraient servir ce but. Si oui, le système de contrôle gaien ('the Gaian control system') inclurait des moyens de détecter si trop ou pas assez de radiations ultraviolettes traversent la couche d'ozone, et de réguler en conséquence la production d'oxyde d'azote. » » [Lovelock, 1979 (2000), pp. 37-38 & 71]

Cette deuxième digression du livre concernant l'ozone stratosphérique s'arrête là ! Le sujet ne semble guère intéresser Lovelock, qui en change rapidement. Plus loin, dans son Chapitre 7 consacré à « Gaia et l'Homme : le problème de la pollution », on ne trouve nulle trace des avions supersoniques, ni des bombes aérosols [Lovelock, 1979 (2000), Chapter 7, pp. 100-114].

L'"ozono-scepticisme" de Lovelock perdura dans les années 1980. Jusqu'à la fin de la décennie 1980, c'est-à-dire après même les mesures de terrain corroborant l'existence d'un trou de la couche d'ozone antarctique qui s'accumulèrent entre 1985 et 1988, le géochimiste anglais continua de questionner la réalité de la destruction anthropique de l'ozone. Et, plus encore, de tenir des discours lénifiant au sujet des répercutions environnementales et sanitaires de la destruction anthropique de l'ozone. La Section "The dermatologists' Dilemna: Ozonemia" de son ouvrage *Ages of Gaia*, publié en 1988, ne laisse pas l'ombre d'un doute sur le fait que l'électrochoc de l'annonce du trou de la couche d'ozone en 1985 n'avait pas opéré sur lui, et qu'il restait un pourfendeur de la théorie de la destruction anthropique de l'ozone en 1988, dont il entendait continuer de faire la satire [Lovelock, 1990 (1988), pp. 164-170].

L'historien Sebastian Grevsmühl rappelle que, en 1982, dans l'épilogue de l'ouvrage Bower F. & Ward R. (Ed.), 1982, *Stratospheric Ozone and Man*, Lovelock s'était même « opposé violemment à l'affirmation selon laquelle la déplétion de l'ozone serait l'un des plus grands risques environnementaux d'une guerre nucléaire [(l'une des conclusions de certains théoriciens des impacts d'une hypothétique guerre nucléaire, dont Crutzen, au cours de la controverse dite de l'Hiver nucléaire)]. Pour le chimiste anglais, ce discours f[aisait] tout simplement partie de « l'hystérie de l'ozone ». » Puis, « Lovelock est resté, jusqu'à la fin des années 1980, l'un des grands critiques des théories de la déplétion de l'ozone », rappelle

S. Grevsmühl. Plus tard, dans son autobiographie *Homage to Gaia : The Life of an Independent Scientist* (2000), Lovelock écrira que, s'il avait écrit dans ses premiers articles sur les CFC que ceux-ci ne représentaient aucun danger, c'était parce qu'il « voulait éviter à tout prix que des Verts politisés ne s'emparent des résultats de son article ('politically minded Greens would seize on the paper') ». [Grevsmühl, 2012, pp. 373-374 ; Lovelock, 2000, p. 203]

… Admettons que J. Lovelock dise vrai, qu'il craignait dans les années 1970 une confiscation de l'environnement par des « Verts politisés », aux dépens des scientifiques. L'explication peut tenir. A l'époque, les mouvements environnementalistes étaient assez déjà largement solidaires des mouvements anti-nucléaires (et même, leur étaient largement coextensifs), alors que Lovelock ne montrait encore peu d'inquiétudes au sujet des atteintes faites par l'homme à Gaia, et en particulier la plus dangereuse d'entre elles d'après lui : le changement climatique d'origine anthropique [Lovelock, 1971 & 2000 (1979)]… Aussi ne voyait-il pas l'intérêt d'épargner des « Verts politisés » souvent "techno-sceptiques" (tout l'inverse de Lovelock !). Dans les années 1980, en revanche, alors qu'il redoute à présent le changement climatique (que dire des décennies suivantes, au cours desquelles sa Gaia deviendra de plus en plus vulnérable ?), le géochimiste ne croit toujours à la possibilité d'une destruction d'ozone [Lovelock, 1990 (1988)]. Essayons de relier cette singularité à sa vision épistémologique de la Terre.

Comme R. Scorer dans les années 1970, au cours des décennies 1970-80, J. Lovelock juge la science de la destruction anthropique de l'ozone douteuse, et l'urgence à vouloir légiférer sur les CFC beaucoup trop excessive. Sa critique diffère de celle de Scorer sur plusieurs points. En particulier, nulle critique des modèles numériques chez James Lovelock, lui qui développera bientôt l'un des modèles les plus célèbres et les discutés de l'histoire des sciences de l'environnement : « Daisyworld ».[297]

Pas plus que R. Scorer, J. Lovelock n'est un chimiste de la stratosphère. Certes, il est chimiste de formation. Mais, en 1970, il n'est pas reconnu en tant que théoricien des réactions

[297] Ce modèle a été développé au début des années 1980 en réponse aux attaques de « biologistes évolutionnistes ». Le nom « Daisyworld » provient du fait que Lovelock évalua la pertinence de son modèle d'évolution de la biosphère, en peuplant la surface planétaire de son monde imaginaire de pâquerettes claires et de pâquerettes sombres. Il mit de la sorte ces deux plantes aux albédos différentes "en compétition". Le but était de montrer qu'une compétition pouvait s'installer entre différentes espèces vivantes, d'une manière qui allait porter la température moyenne de surface de Gaïa proche d'un optimum de « confort ». Les pâquerettes et d'autres espèces vivantes contrôleraient de la sorte l'environnement global de notre planète… sans pour autant, bien sûr, se sentir "concernées" par le devenir de Daisyworld (ou de Gaïa) prise dans sa globalité. Lorsque la simulation de Daisywold est lancée en présence de pâquerettes, un réchauffement est observé en début de simulation, et un refroidissement en fin de simulation. Au cours de la quasi-totalité de la simulation, on observe une convergence vers un équilibre thermique global. Lovelock entend ainsi montrer que des pâquerettes et d'autres espèces vivantes ont pu modifier le climat global, de manière à le rendre plus hospitalier, nous seulement pour elles-mêmes, mais pour le vivant dans son ensemble. Sur le développement du modèle Daisyworld, voir Tyrrell, 2013, pp. 24-29 et Ruse, 2013, pp. 155-220. Ruse, 2013 offre, en outre, plus généralement, un travail sur Gaia, avec une perspective d'historien des sciences.

chimiques atmosphériques, mais comme scientifique des atmosphères planétaires, ainsi que comme développeur d'instruments aptes à mesurer les concentrations chimiques dans l'atmosphère : sur les planètes voisines de la Terre, en vue de détecter une présence passée ou actuelle de vie (à la NASA, dans les années 1960), ce qui relève de l'exobiologie ou de la géobiologie (Lovelock utilise ce terme 'geobiology') ; dans l'atmosphère terrestre, en vue de détecter la présence de composés à l'état de traces, eux aussi liés de préférence à l'activité du vivant (CC13F, diméthyle de sulfure atmosphérique, hydrocarbones halogénés atmosphériques, CS2, PAN), puisque Lovelock entend expliquer la présence insolite de vie sur Terre à partir d'études sur les atmosphères planétaires. Lovelock ne s'est alors par ailleurs guère intéressé à la stratosphère terrestre. [*Lovelock's official website*, 2014, "Papers by James Lovelock" (2013)]

Pourquoi Lovelock ne croit-il pas en l'hypothèse d'une destruction de l'ozone stratosphérique par les SST et les CFC ? Peut-être tout simplement parce que, comme la plupart des géophysiciens des années 1970, il peine à croire que le monstre géologique qu'est la couche d'ozone puisse être affecté. Ou, il peine à croire que "Gaia la résiliente" puisse être affectée par une poignée d'avions et des molécules chimiques en aussi faibles concentrations. Mais, nous voulons faire une autre proposition : dans les années 1970, l'attitude de Lovelock ressemble à un rejet d'ordre "esthétique" – la théorie de Molina-Rowland est "trop simple" pour être vraie !; une attitude qui est suivie, dans les années postérieures à la "découverte du trou de la couche d'ozone" au milieu des années 1980, par une posture "d'entêtement", où il s'oppose "par inertie ou par goût de la démarcation" au consensus en train de naître. Il ne s'agit bien sûr là que d'une proposition. En tout cas, une chose transparaît dans toutes ses publications sur l'ozone à la fin des années 1970 : Lovelock juge la théorie de Molina-Rowland simpliste, et il lui cherche des limites relative à la théorie chimique, à la théorie dynamique (ce qui n'est pas la même chose que montrer que la simplicité de la théorie induit son rejet, nous en convenons)…

Comme en témoigne la citation que nous avons faite plus haut, Lovelock cherche même « un système de contrôle gaien, qui inclurait des moyens de détecter si trop ou pas assez de radiations ultraviolettes traversent la couche d'ozone, et de réguler en conséquence la production d'oxyde d'azote » [Lovelock, 1979 (2000), p. 71]. Lovelock n'est pas très convaincant. Mais, pour dire vrai, l'ozone stratosphérique ne l'intéresse guère. Le terrain de jeu n'est pas à sa taille. Lovelock veut prouver l'action décisive, centrale du vivant dans les mécanismes de l'environnement global.

Ainsi, dans son modèle, l'atmosphère pourra, ou non, se complexifier et atteindre des états propices à la prospérité du vivant à l'échelle globale. Comme le formule le géochimiste : l'atmosphère pourra, ou non, réaliser son réaliser son « homéostasie atmosphérique par et

pour la biosphère » [Lovelock, 1973]. C'est la biosphère qui est au centre du jeu. Aussi, quelle meilleur terrain d'entraînement que le changement climatique ? Dès les années 1960, Lovelock s'est pris de passion pour la question. En 1971, il signe dans *Atmospheric Environment* un article sous le titre "Air pollution and climatic change". Que peut-on y lire ? Qu'il existe bien un effet de serre d'origine anthropique dû aux émissions de combustibles carbonés, mais que le réchauffement observé est moindre que si cet effet de serre était le seul phénomène atmosphérique nouveau… Dans quel phénomène Lovelock va-t-il, alors, chercher le facteur de contre-balancement ? Dans le vivant, bien sûr. Il propose même, à la fin de son article, l'hypothèse suivante : « il est même possible que l'augmentation des brouillards atmosphériques [– qui est documentée, et que la plupart des scientifiques attribuent, comme l'effet de serre, aux combustions fossiles (qui induisent, notamment, des aérosols soufrés réfléchissants) –] soit une réponse que la biosphère, en tant que système cybernétique, a faite afin de corriger l'effet « de serre » ». L'autre hypothèse de réponse de la biosphère est « l'adaptation ». En effet, écrit-il, il se peut que « le système », « l'écosystème planétaire », comme il l'appelle également, « ait la capacité de s'adapter aux apports ('inputs') de gaz de combustion »… Toutefois, met-il en garde,

> « personne ne connaît les limites de l'adaptabilité de la Nature. Il est possible que le point de rupture ('the breaking point') sera atteint en conséquence des [émissions fossiles, ou encore] des activités agricoles, qui remuent les sols et font s'élever la poussière ('as a result of the soil-dusturbing and dust-raisig activities of farmers'), afin d'essayer de satisfaire les demandes créées par l'explosion de population, qui est indéniablement le résultat de l'activité humaine. » [Lovelock, 1971, pp. 410-411]

Cette expression, menaçante, d'explosion démographique, deviendra une antienne des discours de Lovelock – qui seront bientôt beaucoup plus alarmistes.

Quoiqu'il en soit, Lovelock se désintéresse manifestement de la stratosphère parce qu'elle est "trop simple chimiquement" (… précisément en partie parce que sa composition chimique fluctuerait peu sous l'action des émissions atmosphériques du vivant). A l'inverse, Lovelock déplora précocement le déficit de mesures de la composition chimique de la *troposphère* et d'études sur les effets globaux des transformations chimiques troposphériques. En 1979, dans son premier ouvrage sur Gaïa, Lovelock regrette le caractère embryonnaire de champ d'étude sur la chimie troposphérique globale. Il l'explique par la complexité de la troposphère, qui a conduit les scientifiques à se focaliser, par défaut, presque exclusivement sur la chimie stratosphérique (ou « aéronomie chimique » comme la nomme « le plus célèbre des aéronomes, Sydney Chapman », ajoute Lovelock). Cette complexité de la troposphère aurait deux origines. D'abord, ses « interactions directes » et foisonnantes avec le vivant. Ensuite, sa nature très hétérogène, où se mêlent sans cesse phases gazeuse, liquide et solide –

à l'inverse de la stratosphère et des hautes régions, où, écrit Lovelock (la théorie de la stratosphère évoluera ensuite !), « les réactions chimiques procèdent sous les conditions de pure abstraction de la phase gazeuse ». Il ajoute : « nul mur pour gâter la perfection, à l'inverse de ce qui ce passe dans le laboratoire, avec la vaisselle de laboratoire ». [Lovelock, 1987 (1979) pp. 65-67]

Conclusions

Quelle fut donc, dès lors, la faute impardonnable commise par Scorer ? Visiblement, de s'être *adressé à des journalistes* pour émettre des doutes sur la science de la destruction de l'ozone *au plus fort de la controverse au début de l'année 1975, sous financements de l'industrie*…[298] Or, pour commencer, à en croire la journaliste Sharon Roan – qui ne cite pas ses sources –, Lovelock l'aurait fait lui aussi, quelques semaines avant le début de ses travaux financés par DuPont. Non content de moquer le catastrophisme déraisonnable des lanceurs d'alerte sur les SST et les CFC, au détour d'un paragraphe d'un ouvrage peu référencé et "plus ou moins" 'peer-reviewed', son *Gaia. A new look at life on earth* (1979),[299] Lovelock aurait gratifié

---

[298] Dans les trois communications de Scorer postérieures à sa « tournée » d'un mois aux Etats-Unis du début de l'année 1975 que nous avons trouvées, rien n'indique que Scorer ait cherché à démentir son financement par Hill & Knowlton, et donc indirectement par "l'industrie du CFC" (événement qui aurait été mis en évidence par un reporter du *Los Angeles Times*, d'après Dotto & Schiff, 1978 – que reprend ensuite Oreskes & Conway, 2010, p. 114). [Scorer, 1975, 1976 & 1977]

Nous n'avons par ailleurs pas cherché à retrouver les archives témoignant d'échanges médiatiques, entre Scorer et Molina (ou Rowland), par exemple. Le "Director of Meteorology" du "Weather Underground", Jeffrey Masters, rapportera l'anecdote suivante, dans un article "The Skeptics vs the Ozone Hole" (vers 2003) publié en libre accès sur Internet :

> "CFC industry companies hired the world's largest public relations firm, Hill & Knowlton, who organized a month-long U.S. speaking tour in 1975 for noted British scientist Richard Scorer, a former editor of the International Journal of Air Pollution and author of several books on pollution. Scorer blasted Molina and Rowland, calling them "doomsayers", and remarking, "The only thing that has been accumulated so far is a number of theories." Molina's response was, "The gentleman is good at attacking. But he has never published any scientific papers on the subject." (Roan, 1985)." [http://french.wunderground.com/resources/climate/ozone_skeptics.asp (30/09/2012)]

La source, une fois de plus, est l'ouvrage de Sharon Roan, 1989… qui ne cite pas ses sources.

[299] Remarque importante, à ce propos. Si le mélange des genres entre littérature scientifique et littérature populaire est pleinement assumé par James Lovelock, ce chimiste de formation tient à sa légitimité de scientifique, qu'il défend bec et ongles. Ainsi, pas plus que son prédécesseur *Gaia, A new look at life on earth* (1979), son *Ages of Gaia* de 1988 n'est référencé scrupuleusement comme le serait un article ou un ouvrage scientifique. Mais, affirmera Lovelock dans sa Préface à l'édition de 2000 d'*Ages of Gaia*,

> « ce livre a[vait] été révisé par les pairs ('peer reviewed') aussi minutieusement qu'un article dans un journal scientifique. Par coutume, les scientifiques ne ressentent aucune obligation de citer la littérature 'peer reviewed' (*sic*). Ils regardèrent ce livre comme s'il appartenait au domaine public et comme si toute science qu'il contenait était libre d'utilisation sans citation dans leurs articles publiés – ils n'étaient pas conscients qu'il avait déjà été revue par les pairs ('peer reviewed') sur les instructions du 'Commonwealth Fund'. [Lovelock, 2000 (1988), p. xv-xvi]

… Si bien que Lovelock se plaignit que son travail novateur sur Gaia ait été pillé ! Il poursuit en effet comme suit :

> "Those who mined my hypotheses about self-regulation did so without realizing that the intellectual property was already staked out by this peer review. The ore seams are still rich, and I hope that future miners will give proper reference to Gaia, the source of their discoveries." [Lovelock, 2000 (1988), p. xvi]

En revanche, Lovelock ne semble pas avoir entrepris la démonstration de l'existence d'une révision par les pairs pour son ouvrage de 1979, *Gaia, A new look at life on earth*. Aucune tentative de ce type, en tout cas,

Sherwood Rowland de quelques aménités à la fin de l'année 1974, lors d'un entretien accordé à un reporter anglais de la presse quotidienne, enjoignant l'Américain de se rallier à sa « prudence britannique ('British caution') ». Il était en effet alors très prématuré, selon Lovelock, de penser que nous nous trouvions « dans la première phase d'un incident grave de pollution globale » [Roan, 1989, p. 29 ; voir note n°8 dans ce chapitre]… Que cet événement soit rapporté fidèlement ou non, tout se passe en tout cas comme si Oreskes et Conway se montraient indulgents envers Lovelock, *sous prétexte qu'*il fût devenu depuis une icône de l'environnementalisme, avec sa théorie Gaia.

Or, pour commencer, l'écologie politique de Lovelock n'est pas l'écologie politique de tous. Il se trouve même aux antipodes de la plupart des militants de la société civile en Occident. Et, lorsque les auteurs de SHS ont adopté le nom de Gaia à partir des années 1990, ils se le sont complètement réappropriés, et ils se sont fondamentalement démarqués de l'écologie politique de J. Lovelock – nous pensons par exemple à Karen Litfin dans "Gaia theory: intimations for global environmental politics", ou à Isabelle Stengers dans *Au temps des catastrophes* [Litfin, 2005; Stengers, 2009].

Autre point. Le très bref contrat privé qu'accepta (peut-être naïvement, il est vrai) Scorer n'était dans son esprit destiné qu'à défendre sa vision des sciences (et en particulier du rapport science-politique)… Et, ironiquement, un modèle de société incompatible avec le mode de développement de grands groupes industriels de type DuPont ! (Voir notre Sous-chapitre suivant)

Ensuite et surtout, l'attitude prudente qu'adopte Scorer face à l'annonce subite de déséquilibre environnemental global par Johnston, Molina, Rowland, Crutzen, *etc.* est très répandue au sein de la communauté scientifique de l'époque. Le météorologiste Scorer et le géochimiste Lovelock ne sont pas les seuls à penser que l'homme ne peut pas avoir un impact *rapide* sur la couche d'ozone ; c'est également l'avis de nombreux spécialistes de l'aéronomie chimique [*Cf.* Nicolet, 1978].

Enfin, il faut ajouter que, certes, dans les années 1970, Scorer est principalement préoccupé par les questions d'environnement local et régional (au Royaume-Uni, Scorer milite activement en faveur de la diminution de certaines pollutions de l'air et de la

---

dans les préfaces à l'ouvrage de 1987 et 2000 [Lovelock, 1987 (1979), pp. vii-xv ; Lovelock, 2000 (1979), pp. vii-xviii]. (Par contre, il se plaint que « la plupart des critiques de Gaia [soient] provenus de scientifiques qui avaient lu la première édition de ce livre [, et qu'] aucun d'entre eux [… n'eût] lu les dix articles environ sur Gaia dans les 'peer-reviewed scientific journals' [Lovelock, 2000 (1979), p. x]. Les deux premiers articles de ce type sont Lovelock, J.E, 1972, "Gaia as seen through the atmosphere", *Atmospheric Environment (1967)* (Elsevier), **6** (8), pp. 579-580, et Lovelock J.E. & Margulis L., 1974, "Atmospheric homeostasis by and for the biosphere: the Gaia Hypothesis", *Tellus* XXVI, pp. 2-10.)

Nous revenons sur la théorie Gaia et le type d'environnementalisme de Lovelock à la fin du Chapitre 7.

conservation de l'environnement, comme en témoigne avec force son rapport de 1972, *A Radical Approach to Pollution, Population and Resources*; [Scorer, 1972 (1)]). Certes, en ce qui concerne le global, Scorer s'inquiète surtout de l'épuisement des ressources globales (voir notre Sous-chapitre 5.3). Toutefois, il n'est pas fermé à toute théorie de modification de l'atmosphère et du climat global par l'homme. Ainsi, il demeure certes réservé sur certains points de la théorie du réchauffement climatique (quelle part anthropique ? ; quelles rétroactions ; quelle « preuve […] que quelque conséquence prédite suivrait cette augmentation » ? – « aucune », selon lui). Toutefois, il ajoute que « la prédiction [ancienne] qui disait que le contenu en CO_2 augmenterait avec une utilisation croissante des carburants fossiles [, engendrant « un réchauffement de l'atmosphère »,] a été réalisée » (ce qui en fait « presque l'unique exemple où un effet significatif de l'activité humaine a été prédit et est devenu vrai » !, ajoute-t-il, provocateur comme souvent, en 1975 [Scorer, 1975, p. 702]).[300] Or, à cette époque, rares sont les chercheurs du profil de Scorer, c'est-à-dire des météorologistes travaillant principalement sur des questions régionales, qui s'inquiètent des effets globaux des émissions de CO_2. Et, à la fin des années 1980, Scorer se rangera derrière les conclusions *générales majoritaires* des experts dominants de l'ozone et des experts du CC : l'homme est responsable d'une destruction de la couche d'ozone et d'un changement climatique dangereux [Scorer, 1990 (1) ; Scorer, 1997].

Comment expliquer la divergence d'analyse entre Oreskes & Conway, 2010 et nous ? Elle tient en quatre points.

Premièrement, Oreskes et Conway ont trop volontiers calqué leur analyse des détracteurs de la théorie de la destruction de l'ozone dans les années 1970 sur celle des "climatosceptiques" dans les années 1990-2000 (leur principale étude de cas pour *Merchants of doubt*, qu'ils documentent de manière plutôt convaincante). Ils recyclent leur grille de lecture de la controverse sur le CC dans les années 2000, où "climatoscepticisme" a souvent rimé, selon Oreskes et Conway, avec scientifiques non-spécialistes du CC et avec publications hors

[300] Dans son article du *New Scientist* de 1975, Scorer met en garde sur la complexité, la multifactorialité et les rétroactions qui seraient à prendre en considération pour élaborer à termes une bonne théorie du réchauffement climatique global :

> "I have found no fault with the argument which said that an increase in CO_2 would cause a warming of the atmosphere, and I would not dispute that the mechanism envisaged in the argument is real. What I question is the assumption, which is absolutely central to the prediction, that that mechanism can operate in isolation. The increase in turbidity could well be a direct consequence of the cause which produces the increase in CO_2, or a direct or remote consequence of the increase in CO_2 itself. It could be that the turbidity is irrelevant and that another cause, which is tied to the CO_2 or its cause, is operating." [Scorer, 1975, p. 702]

revues à comités de lecture.[301] Or, la situation de l'ozone aux Etats-Unis dans les années 1970 est très dissemblable. Alors que, dans le cas du CC dans les années 1990-2000, il existe un organe d'expertise référent, le GIEC, accepté par la grande majorité des scientifiques de l'atmosphère et du climat dans le monde et attaqué de "l'extérieur", un tel organe n'existe pas dans les années 1970. Le CIAP est un organe monté dans l'urgence, dont l'autorité tient beaucoup au fait que la NAS fût l'un de ses instigateurs et modérateurs. Mais, il possède très peu d'autorité en-dehors des Etats-Unis.

Pourtant, dès 1974 (et jusqu'en 1977, date de l'amendement de l'US Clean Air Act), les experts scientifiques réunis par la NAS, mais aussi certains administrateurs de l'EPA et certains membres du Congrès états-unien, avaient appelé avec gravité à une réglementation rapide des CFC pour protéger la couche d'ozone, au nom d'un principe de précaution. Une telle précipitation n'avait pas seulement attiré l'ire des industriels, mais avait fait grincer quelques dents parmi les chercheurs de la recherche publique, au premier rang desquels : des scientifiques de l'atmosphère et des géophysiciens. En Europe, en particulier, les conclusions du CIAP sont reçues avec une grande circonspection, pour ne pas dire une certaine stupéfaction. Sur le Vieux continent, en effet, l'heure n'est pas à l'alerte. Entre 1974 et 1977, l'un des spécialistes les plus renommés de l'aéronomie chimique, le Belge Marcel Nicolet travaille, sans subir de grande pression semble-t-il, à son rapport COVOS (groupe d'études sur les COnséquences des VOls Stratosphériques), qui prendra la forme d'un état de l'art « des réactions chimiques de l'ozone dans la stratosphère ». L'ouvrage, achevé en 1977, intègre, en plus des réactions chimiques susceptibles de se produire comme conséquences des vols stratosphériques, les réactions pouvant résulter de la contamination de la stratosphère par les CFC. Mais, Nicolet s'interdit toute conjecture au sujet du devenir de la couche d'ozone. Comme nous l'avons dit, le « Professeur de Géophysique Externe à l'Université Libre de Bruxelles » présente alors les travaux des Molina, Rowland, Cicerone, McElroy, Crutzen, Stolarski, Wofsy, Sze, Walter et Stedman, publiés en 1974 et 1975, comme un « problème posé » sur l'action des « composés halogénés » (et en particulier : chlorés), tout comme « on a[vait] vu [en 1950] le problème posé par les composés hydrogénés [et] en 1970 celui dû aux composés azotés » [Nicolet, 1978, pp. 7, 3, 427 & 9]. Quant aux pouvoirs

[301] Lors d'une interview accordée *au Monde* en 2012, où elle affirmait notamment que « des chercheurs touch[aient] beaucoup d'argent pour attaquer la science », Naomi Oreskes déclarait :

> « Il n'y a pas de débat scientifique sur le fait que le réchauffement a bien lieu et qu'il est principalement le fait des gaz à effet de serre anthropiques et de la déforestation. D'ailleurs, les bouleversements actuels sont en accord avec ce qui a été prévu de longue date par les spécialistes. Avoir un débat scientifique sur telle ou telle question obéit à des règles précises : il se tient entre experts du domaine qui publient leurs résultats dans des publications soumises à la revue par les pairs, c'est-à-dire à l'expertise du reste de leur communauté. Rien de cela ne caractérise ceux qui s'opposent à la science climatique. » [Oreskes, 2012]

Soulignons, tout de même, que la généralisation est exagérée – tout comme le serait le fait d'affirmer qu'aucun "climatosceptique" ne possède un parcours universitaire digne de ce nom, le rendant légitime à donner un point de vue scientifique pertinent sur le changement climatique.

publics et aux médias européens, ils se désintéressent largement de la question (voir la fin du Sous-Chapitre 6.1).

Au-delà de ces considérations nationales (auxquelles il faudrait consacrer des études particulières, qui semble-t-il n'existent pas encore), la communauté des spécialistes de la destruction de l'ozone est elle-même en construction. Dans les années 1970, les chercheurs travaillant sur la possibilité d'une destruction chimique de l'ozone stratosphérique *proviennent presque tous de disciplines autres que l'aéronomie chimique*. On retrouve ainsi dans le CIAP des chimistes de la troposphère, des chimistes de laboratoire, des météorologistes, des géophysiciens, des climatologues, des scientifiques des atmosphères planétaires. Quant aux spécialistes de l'aéronomie chimique (quelques dizaines d'individus dans le monde tout au plus), ils ont jusqu'alors cherché à théoriser un *équilibre* des concentrations d'ozone (d'une année sur l'autre). S'ils souhaitent à présent théoriser une destruction de la couche d'ozone sur de faibles temporalités, ils doivent procéder à un renouvellement en profondeur de leur savoir. Certes, Crutzen se rallie rapidement à l'hypothèse de Johnston (dès 1971) puis de Molina et Rowland (dès 1974). Mais, d'autres, en revanche, tels que Nicolet, prônent la circonspection (nous revenons sur l'attitude des aéronomes et des scientifiques des atmosphères planétaires dans le Chapitre 6).

Deuxièmement, bien que la plupart des acteurs proposant des théories de la destruction de l'ozone par les SST ou les CFC partent plus ou moins sur un pied d'égalité car ne sont pas des spécialistes de l'aéronomie chimique, un clivage se crée bel et bien, entre le CIAP, d'une part, et ceux qui lui sont extérieurs. Deux facteurs renforcent ces identités. D'abord, l'Industrie des SST et des CFC, qui rentre dans une opposition frontale avec le CIAP, et use de méthodes pour le moins contraires à l'éthos scientifique (*cf.* les encarts publicitaires). De plus, le financement des scientifiques de l'université a sans doute desservi les intérêts de l'Industrie. Tant que les scientifiques de la recherche publique travaillaient indépendamment, les chercheurs de DuPont, Cairns et Jesson, pouvaient faire la remarque suivante : « comment se fait-il que [des] scientifiques éminents, non reliés à l'industrie, aient déclaré que les preuves ne fussent pas concluantes, et qu'une interdiction fût prématurée ? » [Cairns & Jesson, 1975, pp. 1040-1041]. Mais, en finançant Lovelock, Scorer, et quelques autres chercheurs issus de la recherche publique entre 1970 et 1975, l'industrie des CFC fit peut-être une erreur stratégique, précisément parce qu'elle les reliait à elle, les rendant "suspects". En tout cas, l'issue de la guerre de l'ozone – la mise en application des règlementations de CFC en 1978 (voir Sous-chapitre 4.3) – semble indiquer que cette stratégie n'a pas été payante.

Ensuite, dans son article "Banning Chlorofluorocarbons: Epistemic Community Efforts to Protect Stratospheric Ozone", Peter Haas a proposé que les scientifiques de l'ozone de la période 1970-85 pouvaient être décrits comme des « outsiders », au sens de Michael Polanyi dans *la République des Sciences* (1962). C'est-à-dire, comme « un petit groupe de scientifiques se trouvant en-dehors de la communauté "mainstream" des scientifiques de l'atmosphère », cette dernière étant composée de physiciens-météorologistes pour la plupart. Selon Peter Haas, la « marginalité » des scientifiques venus subitement à l'étude de la stratosphère après l'alerte de 1971 a pu « renforcer leur identité collective (Polanyi, 1962) ». Le politiste allemand veut voir dans « le groupe de scientifiques [qui a étudié] les CFC » dès le début des années 1970 (Cicerone, Rowland, Molina, McElroy, Wofsy, Stolarski) des « 'outsiders' [… dont] la chimie stratosphérique [n'était pas] le domaine spécifique » d'étude [Haas, 1992(2), pp. 192-193]. La thèse est toutefois doublement problématique. D'abord, dans la mesure où les « 'outsiders' » dont on parle sont pour la plupart partie prenante d'un programme d'expertise, le CIAP, qui se trouve sous la coupe de l'Académie des sciences des Etats-Unis. Ensuite, parce que tous les scientifiques qui défendent les hypothèses de Johnston et de Molina-Rowland ne sont pas étrangers aux problématiques stratosphériques (ainsi, P. Crutzen, par exemple).[302]

Il serait peut-être plus défendable de parler d'un renouvellement de génération, avec l'émergence d'une lignée sans lien avec les études de la Guerre froide. Lorsque Harry Wexler crut, en 1962, à la possibilité d'une destruction anthropique de l'ozone par les navettes spatiales, aucun ne le suivit. Ceci ne signifie pas 'ipso facto' que, à l'image d'Edward Teller ou Frederick Seitz, tous les chercheurs issus du complexe universitaire-militaire-industriel s'entêteront tous dans une voie anti-environnementaliste après 1970. En outre, la jeune génération d'atmosphériciens des années 1970 n'était pas nécessairement sensible, dans un premier temps, aux bouleversements culturels de défense de l'environnement qui avaient émergé à la fin des années 1960. Certains voyaient l'étude de l'impact des CFC sur l'ozone stratosphérique comme un programme de recherche passager, une niche à financements,

[302] Dans notre présente Partie B, nous avons pour notre part préféré souligner le rôle spécifique des chimistes de laboratoire et de la troposphère (*cf.* Chapitre 4), sans exagérer le sentiment d'appartenance à un "groupe" qu'avaient pu ressentir les premiers chercheurs sur les effets anthropiques sur la couche d'ozone. Par ailleurs, il ne faut pas oublier le rôle que jouèrent les chercheurs, déjà spécialistes de la chimie stratosphérique avant 1970, tels que les aéronomes Crutzen et Nicolet, ainsi que leurs proches collaborateurs (Ehhalt et Mégie, respectivement) et leurs étudiants (Solomon et Brasseur, respectivement), que l'on trouve actifs dans la littérature scientifique à partir de la fin des années 1970, puis omniprésents dans les comités d'écriture des chapitres de *WMO*/…, 1985, parfois même comme directeur de comité d'écriture (cas de Brasseur, co-directeur du 'panel' du Chapitre 8 de *WMO*/…, 1985) [*WMO*/…, 1985]. Pour ces gens, l'étude de l'ozone était indubitablement prise très au sérieux (il n'était pas un simple travail de circonstance, comme le vécut à l'inverse R. Stolarski au début des années 1970 – voir corps du texte). Non seulement il s'agissait de mener à bien un programme de recherche sur une inédite potentielle catastrophe chimique globale, mais également de construire une discipline nouvelle, la chimie atmosphérique globale, indépendamment de l'aéronomie traditionnelle, hermétique (ou presque) aux pollutions terrestres et occupée à élaborer de très longs récits d'évolution de l'atmosphère. Nous développons ce point dans le Chapitre 6.

plutôt qu'un nouveau programme de recherche scientifique pérenne. Au cours d'un entretien, Richard Stolarski déclarera ainsi que le programme sur l'ozone stratosphérique, stimulé par Harrison et Johnston, lui était alors apparu (vers 1972) « comme un endroit joli et *paisible* de la stratosphère à découper ('a nice, *quiet* piece of the stratosphere to cut off'), et dont [lui et ses collègues] pourr[aient] peut-être obtenir un article ou deux tout en apprenant, et personne de viendrait [les] embêter ». A ce propos, Scorer ne se gênera pas pour caricaturer en poule aux œufs d'or le programme de recherche sur l'ozone dans les années qui suivirent l'alerte de Molina-Rowland : la peur d'une catastrophe sanitaire globale assurait des financements immédiats et abondants pour la recherche sur les CFC et la stratosphère…[303] [Haas, 1992(2), p. 192]

Troisième point de divergence entre notre analyse et celle de Conway et Oreskes : selon un principe de symétrie chère aux STS,[304] nous nous évertuons à traiter les différents acteurs de la controverse de la même manière, qu'ils soient dans un camp ou dans un autre. Or, pour écrire *Merchants of doubt*, Oreskes et Conway mettent parfois ce principe au placard.

Premier exemple. Lorsque, en 1971, Harold Johnston ou James McDonald rentrent (presque) seuls en conflit avec les experts du SCEP ('Study of Critical Environmental Problems'), des spécialistes incontestés de l'atmosphère globale, leur entreprise est décrite de manière héroïsée. Tout se passe comme si Johnston et McDonald *étaient* dans le vrai au début des années 1970 "*parce que*" protéger la couche d'ozone *est* une évidence pour (presque) l'ensemble des scientifiques, gouvernements et citoyens occidentaux de nos jours (voire, au mieux, depuis la toute fin des années 1980).

Deuxième exemple. Oreskes et Conway ne se bornent pas toujours à montrer la production du doute par certains groupes ou individus financés par l'industrie, ou à mettre

---

[303] Et, ces financements avaient peut-être plus de chances de croître en cas de réglementation des CFC. Le météorologiste britannique rapporte en tout cas que, en septembre 1976, alors que le gouvernement fédéral venait d'adouber la NASA comme nouvelle institution de référence d'expertise sur l'ozone stratosphérique aux Etats-Unis (voir Chapitre 6), et que la perspective de réglementations des CFC devenait très probable, l'un des membres de l'agence spatiale, Dr Noel W. Hinners, « exprima ouvertement » (écrit Scorer) que,

> « quand bien même des réglementations des CFM (chlorofluorométhanes, qui sont pour la plupart commercialisés par Dupont de Nemours sous la marque déposée Fréon) seraient effectuées [dans les années à venir], les financeurs de la recherche ne devr[aient] pas penser que la recherche n'[était] plus urgente, mais au contraire « plus importante que jamais » [Hinners, 1976, lors « une conférence de trois jours à Logan dans l'Utah » **in** Scorer, 1977 (2), pp. 655-656]

[304] Le principe de symétrie n'a de sens que dans un cadre relativiste – par exemple, la 'Sociology of Scientific Knowledge' et les '*Science Studies*' –, dans lequel « non seulement la connaissance est conditionnée socialement, mais [également] sa validité ». Enoncé d'abord par David Bloor (1976), le principe de symétrie, rappelle le sociologue des sciences Olivier Martin, stipule que « les explications fournies par le sociologue [ou l'historien] doivent être symétriques, ce qui signifie que les mêmes types de causes doivent être utilisés pour expliquer les croyances vraies et les croyances fausses » ; ou, dit autrement : les mêmes types de causes (sociales) doivent être utilisés pour expliquer que les acteurs se trouvent dans le camp d'un consensus ou lui sont étrangers. En d'autres termes, « il n'y a aucune raison de faire appel à des causes d'ordre naturel pour expliquer » de quel côté de la barrière (sociale !) se retrouvent les acteurs de la controverse. [Martin, 2000, pp. 78-79]

en exergue les lieux de pouvoir qu'occupent les scientifiques ;[305] ils tirent des enseignements de leur origine disciplinaire et de leur parcours scientifique. La démarche n'est pas condamnable en soi ; mais, pour démontrer la supériorité de leurs champions "sanctionnés par l'histoire", Oreskes et Conway se livrent parfois à des sélections partiales des CV des acteurs (en réponse à *Marchands de doute*, O'Keefe et Kueter leur rendront l'appareil, en glorifiant le passé des fondateurs du 'Marshall Institute' que condamnent Oreskes et Conway – c'est de bonne guerre ! [O'Keefe & Kueter, 2010]). Ainsi, le lanceur d'alerte James McDonald est présenté comme « de l'Université d'Arizona, membre du Panel de l'Académie des Sciences sur la Modification du temps et du climat » ; Richard Scorer, par contre, n'est qu'un "vulgaire" « professeur britannique de mécanique théorique à l'Imperial College », sans lien visiblement avec la communauté des scientifiques de l'atmosphère, et qui semble par conséquent tomber dans la controverse comme un cheveu sur la soupe. Or, Scorer était non seulement un météorologiste, mais l'un des principaux spécialistes des pollutions atmosphériques au Royaume-Uni. McDonald avait une formation semblable de météorologiste (il était même en particulier, comme Scorer, un spécialiste des formations nuageuses). [Oreskes & Conway, 2010, pp. 54-55 & 108-114 ; McDonald, 2012]

Nous pouvons également reprocher à Oreskes et Conway de ne pas prêter scrupuleusement attention aux différentes « arènes » dans lesquelles se trouvent les acteurs. Ainsi, ils ne distinguent pas entre les auditions devant le Congrès, les travaux publiés dans les revues avec comité de lecture, les articles publiés dans les revues de vulgarisation scientifiques, *etc.* Ceci est d'autant plus fâcheux que l'argument massue de Conway et Oreskes pour délégitimer Scorer et les « marchands de doute » consiste précisément à affirmer que ceux-ci s'exprimeraient uniquement en dehors de revues à comité de lecture (ce que n'a de cesse de faire, précisément, Lovelock, en outre !), alors que ces dernières constituent, selon les historiens, le seul lieu où peut se développer sereinement une controverse scientifique.[306]

Reprenons l'exemple de James McDonald. Il est exact que, au tournant des années 1970, il est un physicien de formation et météorologiste reconnu, membre de la

---

[305] Par exemple, les deux historiens dénoncent l'entreprise quasi-conspiratrice d'un « petit groupe d'initiés », « 'insider phycists' dirigés par Edward Teller », qui encourageaient, à la fin des années 1960 aux Etats-Unis, la recherche sur les armes nucléaires « au-delà de l'objectif défensif raisonnable », « alors que de nombreux scientifiques universitaires restaient sur la touche, d'où ils observaient avec méfiance. » [Oreskes & Conway, 2010, pp. 38-47]

[306] Dans leur introduction, Conway et Oreskes écrivent :

> « Chaque article ou rapport scientifique doit passer par l'examen critique d'autres experts : la révision des pairs ('peer review'). Il est requis que les auteurs scientifiques doivent prendre en compte sérieusement les commentaires et critiques des 'revieweurs', et corriger toute erreur qui a été trouvée. C'est une éthique fondamentale du travail scientifique : aucune déclaration ne peut être jugée valide – pas même *potentiellement* valide – avant qu'elle ne soit passée par une révision des pairs. » [Oreskes & Conway, 2010, p. 3]

Or, n'ont de cesse de démontrer les auteurs, les « marchands de doute » se dérobent très largement à cette éthique.

prestigieuse 'American Meteorological Society', et a de plus et surtout travaillé sur les impacts des SST dès 1966, à l'invitation de la NAS. Ceci lui donne toute légitimité à délivrer une expertise au Congrès en mars 1971. James McDonald n'a en revanche jamais publié sur l'ozone, ni plus généralement sur la chimie de l'atmosphère, dans des revues à comité de lecture. Dans sa bibliographie la plus complète, compilée par son fils aîné Kirk T. McDonald (physicien des hautes énergies à Princeton), on ne trouve même aucun rapport technique ni article sur les impacts des SST, sur lesquels il avait travaillé à l'invitation de la NAS dès 1966. Ceci tend à indiquer qu'il traita le sujet de manière très épisodique et comme activité secondaire [McDonald, 2012]. J. McDonald connaissait moins encore le champ de l'épidémiologie. Il n'en délivra pas moins devant les membres du Congrès une estimation alarmiste – chaque pourcent de destruction d'ozone, par la vapeur d'eau des SST (théorie rapidement abandonnée), provoquerait six pourcent d'augmentation de cancers de la peau.[307] Oreskes et Conway ne s'alarment pas de ces pratiques, pourtant parfaitement étrangères au processus de 'peer-review'. [Oreskes & Conway, 2010, p. 108]

Quatrième et dernier point. En cumulant simplement des preuves de lobbying des industriels allant à l'encontre de la "bonne science consensuelle" de la NAS, Conway et Oreskes voient que, si les industriels états-uniens finirent par subir la réglementation de certains CFC (en 1978), en partie parce que leur science de contre-expertise avait été prise de vitesse par les experts regroupés dans le CIAP, ils ne perdirent pas totalement la partie, puisque ces réglementations furent très limitées (voir notre Sous-chapitre 5.4). Les deux historiens nient par contre le fait que la science de la destruction anthropique de l'ozone au milieu des années 1970 était jeune et limitée. Les scientifiques qui, soit adoptèrent une posture circonspecte (ainsi, M. Nicolet), soit exprimèrent une colère (ainsi, R. Scorer) ne sauraient être accusés d'être réservés 'a priori' au sujet de toute forme de réglementation environnementale. Il se trouve même que, comme nous le montrons dans le Sous-chapitre suivant, Scorer exprima avec force *l'une des versions* du "tournant environnementaliste" des années 1970 – *qui est une version autre que celle des Johnston, Molina, Rowland.*

[307] Finalement, la seule "publication" de J. McDonald sur la couche d'ozone demeure son "Statement submitted to hearings before the House Subcommittee on Transportation Appropriations" ("Relationship of skin cancer incidence to thickness of ozone layer", Mar. 2, 1971, *Cong. Rec. 117*, 7252 (1971)). Dans les années 1950 et 1960, McDonald a notamment beaucoup travaillé sur la modification artificielle du temps et, comme nous l'avons dit, sur les OVNI, ce qui a concouru à lui faire produire de nombreuses publications sur les processus de condensation des nuages (phénomène à maîtriser en vue de produire de la pluie artificiellement). Pour la stratosphère, on trouve dans sa bibliographie un unique article, publié en 1963 dans *Science* ("Stratospheric Cloud over Northern Arizona", *Science* 140, 292 (1963)). Toujours dans les "refereed journals", on ne trouve par ailleurs qu'un unique article résultant d'une étude spécifique sur les gaz d'échappement des avions ("Visibility Reduction due to Jet-Exhaust Carbon Particle", *J. Appl. Meteor.*, 1, 391 (1962)). En définitive, on peut conclure que McDonald travailla seulement de manière fugace sur la stratosphère et les émissions des avions. Seul son « rapport technique » pour le Congrès (1971) se trouve à la rencontre des deux problématiques. [McDonald, 2012, publications de J.E. McDonald]

Il faut voir la critique de l'expertise de la destruction anthropique de l'ozone de Scorer dans les années 1970 avant tout comme *un prétexte pour questionner une utilisation tous azimuts et/ou dans l'urgence d'expertises scientifiques*, cet usage rimant, souligne R. Scorer, avec la non-moins-croissante technologisation des problèmes de société dans les années 1970. Or, du fait du type d'approche qu'ils privilégient, Oreskes et Conway passent hélas à côté de la profonde remise en question culturelle qu'appelle de ses vœux Richard Scorer ; ils se focalisent sur les argumentaires scientifiques et "pseudo-scientifiques" (ceux des « marchands de doute »), là où la mise en œuvre ou l'échec des gouvernances dites "environnementales" provient souvent de logiques économiques et de biais culturels. Scorer est en fait, nous le verrons, un critique redoutable du type de développement industriel dominant de son époque, et du prétendu progrès qu'il apporterait. Le programme politique qu'expose le Britannique dans ses livres, en particulier dans son rapport de 1972 et son pamphlet de 1977, entre en fait beaucoup plus radicalement en conflit avec les intérêts des industriels que les simples réglementations préconisées par Molina, Rowland, Johnston, le CIAP, l'EPA…

Pour le dire autrement, les savoirs et les stratégies des chimistes Rowland et Molina, d'une part, et du météorologiste des pollutions de l'air Richard Scorer, d'autre part, sont "incompatibles" plutôt que "contraires". Rowland et Molina s'insèrent dans une "technocratie" des pollutions atmosphériques, telle qu'elle triompha notamment au sein de l'EPA à partir de 1970 puis dans la plupart des gouvernances de l'environnement nationales et internationales. Elle prône une expertise "neutre", dont le cœur ontologique est un réductionnisme chimique associé à une statistique épidémiologique. Elle privilégie des gouvernances compartimentées, problématique par problématique, secteur par secteur, qui utilisent l'approche par 'Best Available Technologies' (ou une version approchante). Scorer, au contraire, propose une écologie politique où les pollutions atmosphériques doivent être traitées dans un cadre politique général, qui ne se limiterait pas à quelque "technological fix" (termes que Scorer emploie), et qui n'appellerait pas une fuite en avant vers une quantité de savoirs quantitatifs toujours plus nombreux et spécialisés. Dans son ouvrage très "physicien" d'« aérodynamique environnementale » de 1978, Scorer, après avoir dénoncé en introduction la « grande extravagance » d'un âge où la théorie de la destruction de l'ozone n'avait pu « se développer lentement [à l'aide] d'hypothèses plus modestes » mais avait pourtant obtenu une grande « attention publique », n'en appelait pas moins, dans l'épilogue, à « faire la paix avec la nature. » [Scorer, 1978, pp. 12-13 & 461]

5.3. Le Scorer "politique" : la crise environnementale comme crise politique et culturelle d'un monde globalisé

La troisième de couverture de son ouvrage scientifique *Meteorology of Air Pollution. Implications for the environment and its future*, publié en 1990, décrit Richard Segar Scorer comme « un homme ayant beaucoup voyagé », et dont les « intérêts personnels » incluent la construction et la pratique de divers instruments de musique, le cyclisme.[308] Dans les années 1970, Richard Scorer fut en tout cas un météorologiste atypique, qui se démultiplia dans les arènes scientifique, politique voire médiatique. A son travail de météorologiste et de professeur d'université ès Mécanique théorique à l'Imperial College de Londres, répond alors une activité d'expert scientifique des pollutions de l'air. Il est membre du 'Metropolitan Water Board' entre 1971 et 1974, et du 'Clean Air Council' du Royaume-Uni (établi par le 'Clean Air Act' de 1956) – dont il démissionnera en 1980.

S'y ajoute une importante activité d'écriture. En plus de ses articles scientifiques sur les normes de pollution de l'air (Scorer, 1971 (2)) et la théorie de la destruction anthropique de l'ozone stratosphérique (Scorer, 1977 (2&3)), publiés pour la plupart dans *Atmospheric Environment* (journal qui avait remplacé en 1967 l'*International Journal of Air Pollution*, dont Scorer avait été le rédacteur en chef), Richard Scorer s'engage volontiers dans des échanges de points de vue moins normalisés avec ses pairs. Au cours des années 1971-77, Scorer fait ainsi des apparitions sous différentes formes dans la revue d'*Atmospheric Environment*, au sein des rubriques "Discussions", "Author's reply", "Commentary" ou "Report", afin de commenter les expertises et politiques de l'air (Scorer, 1971 (1) ; Scorer, 1972 (2) ; Scorer, 1973) puis de l'ozone stratosphérique suite à l'alerte de Molina-Rowland (Scorer, 1976 (1&2)).

Outre l'élaboration et le contrôle de l'application des normes de qualité de l'air, il existe un aspect plus "patrimonial" de l'action *locale (ou régionale)* de Scorer en faveur de l'environnement. Le météorologiste est en effet membre à vie de la 'Conservation Society'. Et, entre 1976 et 1979, il exerce la fonction de Conservateur ('Conservator') des 'Wimbledon and Putnay Commons', au Sud-ouest de Londres. Enfin, son engagement pour la "protection de l'environnement" se prolonge dans la société civile. En 1972, il est signataire de la pétition *A Blueprint for Survival* (d'abord publiée dans *The Ecologist* en janvier 1972), aux côtés de

[308] Le lecteur désireux de connaître de plus nombreux détails biographiques au sujet de R. Scorer pourra se rendre sur le site de la 'Royal Meteorological Society'. Il y trouvera une sélection d'entretiens en fichiers audio, dont le début d'un entretien de Scorer enregistré en 1985, ainsi que d'autres « voix distinguées de la météorologie » (G.M.B. Dobson, R.M. Goody, D. Bates *etc.*). Voir http://www.rmets.org/about-us/history-society/distinguished-voices-audio (04/07/2014).

Julian Huxley, et d'une trentaine d'autres scientifiques et intellectuels influents, britanniques pour la plupart. Ce texte pressait les instances politiques britanniques à l'action, face aux menaces qui pesaient sur l'environnement à travers le monde ; leurs auteurs s'inscrivaient dans la lignée du Club de Rome. *A Blueprint for Survival* visait à créer une attente au sujet de l'UNCHE en préparation (qui allait se dérouler à Stockholm les 5-16 juin 1972) et d'en influencer les débats.[309] Par ailleurs, Scorer est membre de la 'British Humanist Association', association laïque et humaniste fondée en 1896. L'autre volet de l'action publique de Scorer se fait comme candidat et élu. Au cours des années 1970, Scorer est candidat au Parlement pour le 'Labour Party', et Conseiller municipal ('Alderman') du 'London Borough of Merton' (1971-78). [Scorer, 1990 (1), 3ème de couverture ; Scorer, 1977 (1), 3ème de couverture ; Scorer, 1972 (1), 3ème de couverture]

Il ne s'agit pas pour nous ici de dérouler en détail le programme politique de Richard Scorer, qu'il expose notamment dans ses ouvrages brocardeurs *A Radical Approach to Pollution, Population and Resources* (Scorer, 1972 (1)) et *The Clever Moron* (Scorer, 1977 (1)). A la place, nous nous évertuons à inscrire la pensée politique de Scorer dans des mutations culturelles et politiques (réflexions sur les limites de l'environnement et de la croissance, notamment) ; et, en particulier, à discuter son examen critique précoce du nouveau régime des sciences atmosphériques qui s'impose dans les années 1970 (qui s'incarne notamment dans une nouvelle forme de technicisation des politiques de pollutions atmosphériques :

---

[309] La préface ('Preface : A Blueprint for Survival') du numéro spécial de *the Ecologist* entièrement consacré au texte-pétition (Vol. 2, n° 1, janvier 1972) était la suivante :

> "This document has been drawn up by a small team of people, all of whom, in different capacities, are professionally involved in the study of global environmental problems.
>
> "Four considerations have prompted us to do this:
>
> An examination of the relevant information available has impressed upon us the extreme gravity of the global situation today. For, if current trends are allowed to persist, the breakdown of society and the irreversible disruption of the life-support systems on this planet, possibly by the end of the century, certainly within the lifetimes of our children, are inevitable.
>
> Governments, and ours is no exception, are either refusing to face the relevant facts, or are briefing their scientists in such a way that their seriousness is played down. Whatever the reasons, no corrective measures of any consequence are being undertaken.
>
> This situation has already prompted the formation of the Club of Rome, a group of scientists and industrialists from many countries, which is currently trying to persuade governments, industrial leaders and trade unions throughout the world to face these facts and to take appropriate action while there is yet time. It must now give rise to a national movement to act at a national level, and if need be to assume political status and contest the next general election. It is hoped that such an example will be emulated in other countries, thereby giving rise to an international movement, complementing the invaluable work being done by the Club of Rome.
>
> Such a movement cannot hope to succeed unless it has previously formulated a new philosophy of life, whose goals can be achieved without destroying the environment, and a precise and comprehensive programme for bringing about the sort of society in which it can be implemented.
>
> "This we have tried to do, and our *Blueprint for Survival* heralds the formation of the Movement for Survival and, it is hoped, the dawn of a new age in which Man will learn to live with the rest of Nature rather than against it.
>
> *The Ecologist*
> *Edward Goldsmith, Robert Allen, Michael Allaby, John Davoll, Sam Lawrence."*
> [*Ecologist (the)*, 1972, preface]

mise en place de normes de qualité de l'air par l'EPA, premières tentatives d'harmonisation (différenciée) des objectifs de réduction de polluants à l'échelle internationale au sujet de problèmes jugés "globaux", *etc.*

S'émanciper du dogme de la croissance des "centralisateurs"

Des limites régionales de l'environnement à la pensée des Limites globales

Au début des années 1970, Richard Scorer publie plusieurs textes à contre-courant de la logique dominante de gestion des pollutions de son époque. Il juge les systèmes de réglementation par normes de qualité de l'air qui sont en train d'être mis en place difficilement applicables, et donc probablement inaptes à imposer des seuils maximaux de pollution. De plus, il prévoit que, au lieu d'enclencher une dynamique vertueuse de baisse générale des polluants dans l'air, ces systèmes vont étendre le domaine d'extension géographique des pollutions de l'air à de nouvelles aires urbaines et de nouvelles régions, qui s'aligneront sur les territoires les plus polluées. Ce reproche, que nous avons déjà rencontré dans le Sous-chapitre 3.2 sur les réglementations des précurseurs de smog, constitue un leitmotiv critique sur les politiques des pollutions, que l'on trouve déjà, par exemple, chez Robert A. Smith [Smith, 1872] ; mais, chez Scorer, cette contamination des aires polluées est à présent pensée, à la fois à l'échelle régionale et à l'échelle globale. Enfin, plus généralement, Scorer ne se limite pas à disserter sur les conséquences immédiates, locales des politiques de pollution de l'air, mais fait l'expérience de pensée des conséquences environnementales globales qui résulteront irrémédiablement de la "duplication" du modèle économique de l'Occident (qu'il soit, ou non, accompagné de la "duplication" de son modèle de gestion des pollutions.

Ainsi, dans deux textes datés de 1971, publiés dans *Atmospheric Environment* sous les titres "The crime of pollution standards" (Scorer, 1971 (1)) et "New attitudes to air pollution – the technical basis of control. Review Paper" (Scorer, 1971 (2)), le météorologiste anglais commence par récuser la logique des « normes de qualité de l'air », qui sont en train d'être instaurées aux Etats-Unis par l'EPA, qui vient d'être créée (en 1970). Cette approche technicienne est boiteuse à de nombreux égards, juge-t-il. Parmi ses limites, on compte l'impossibilité de réglementer ensemble plusieurs polluants alors pourtant qu'ils « agissent de manière synergique » ; mais aussi, bien sûr, la difficulté (l'impossibilité dans la plupart des cas, selon Scorer) d'attribuer une pollution à une source en raison des fluctuations météorologiques – contrairement à ce que prétend pouvoir réaliser son collègue de Seattle, H. Reiquam qui, une fois fixé un fardeau supportable de pollution de l'air, entend déterminer des seuils d'émissions maximales pour des régions données à l'aide de son

modèle numérique de dynamique atmosphérique dit « modèle de bassin atmosphérique ('airshed model') ».[310] Scorer n'énonce pas moins de « six niveaux » possibles de recours juridiques qui se retrouvèrent à disposition des responsables d'infractions supposées aux normes de qualité de l'air, en cas de plaintes déposées contre eux. Intenter des procès en justice contre les pollueurs, affirme le météorologiste, serait par conséquent pratiquement vain, en raison des « incertitudes techniques », qui profiteront nécessairement aux accusés. [Scorer, 1971 (2), pp. 923-924]

La malfaçon de la procédure états-unienne ne s'arrête pas là. Scorer prévoit que sa mise en place conduira à une situation où les sources de pollution seront simplement savamment dispersées sur le territoire urbain, délocalisées (dans les banlieues des villes, typiquement), si bien que les pollutions augmenteront de manière générale, jusqu'à un certain seuil maximal, comme dans le cas de la gestion de l'eau… Or, fait remarquer Scorer, « la gestion des ressources en air n'a rien à voir [avec la gestion de l'eau, car] l'air appartient à tout le monde et nous vivons dedans ».[311] Il poursuit :

> « L'idée que nous pourrions « optimiser » les émissions de polluants dans un « bassin atmosphérique » équivaut à y maximiser la pollution de l'air en la distribuant afin qu'elle n'augmente jamais au-dessus d'une norme, mais qu'elle devienne partout aussi proche que possible de la norme. » [Scorer, 1971 (1), p. 819][312]

Scorer voit dans cette nouvelle philosophie le résultat de « pressions économiques ». Avec la mise en œuvre de normes de pollution de l'air, « autant de pollution peut être émise qu'il est possible, avec l'objectif présumé de maximiser la richesse produite. […] Voilà bien le danger des normes de qualité de l'air : elles sont ce que des industriels exploitants de la

---

[310] Or, Scorer affirme que notre connaissance météorologique est très loin d'être suffisante pour modéliser la diffusion des pollutions. « Rien de quantitatif n'est vraiment connu au sujet du transport de pollution vers des points de l'atmosphère situés au-dessus des sources, à l'exception de ce qui peut être déduit des observations visuelles ; or, ajoute-t-il de manière entendue, une telle connaissance est un *sine qua none* à tout modèle fiable » [Scorer, 1971 (2), p. 924]. Quant à John Seinfeld, l'un des premiers modélisateurs numériques de la chimie des smogs, il reproche au modèle de bassin atmosphérique de Reiquam, à la fois de se limiter à des « conditions météorologiques à l'équilibre ('steady state') (des moyennes sur de longues durées) », et de ne pas simuler les réactions chimiques (tellement importantes, par exemple, pour comprendre les pollutions de Los Angeles que Seinfeld modélise) [Seinfeld & Chen, 1973, pp. 87-88].

[311] De plus, dans le cas de sources de pollutions diffuses et nécessairement émises proches du sol, telles que les pollutions automobiles (comme à Los Angeles), une telle procédure de délocalisation est hors de propos [Scorer, 1971 (1), p. 819 ; Seinfeld & Chen, 1973, pp. 87-88].

[312] Cinq ans plus tard, dans son « Chapitre 4. Normes de Qualité de l'Air ambiant et Application » pour le Rapport "Manual on urban air quality management" de l'OMS (Copenhagen, « WHO European series », 1976), Bernhard Prinz, de l'Institut d'Etat pour la Lutte contre la Pollution atmosphérique et la Protection des Sols à Essen (RFA), reprend la conclusion de Scorer :

> « [U]n malentendu fondamental au sujet de la gestion de la qualité de l'air paraît exister dans certains milieux (Citation de Prinz : Scorer, 1971, "The crime of pollution standards", *Atmospheric Environment*, 5, pp. 57-64 ; il s'agit très vraisemblablement, mais avec une pagination différente, des discussions du numéro d'*Atmospheric Environment* dans lesquelles figure le texte Scorer, 1971 (1)). Le but de cette gestion est de réduire au minimum les émissions dans une zone donnée, en ayant pris soin que les normes admissibles pour la qualité de l'air soient partout respectées ; il n'est jamais de laisser la pollution s'accroître peu à peu dans toute la région jusqu'à une valeur tout juste inférieure à la limite. » [Prinz, 1976, p. 59]

nature, capitalistes et motivés par le profit, sont en train d'essayer de nous faire accepter afin que nous ne puissions plus objecter quoi que ce soit au sujet de ce qu'ils font, tant qu'ils ne polluent pas au-delà de cette limite. » Et d'ajouter, emphatique comme souvent :

> « Il s'agit là d'un crime contre l'humanité ('crime against humanity' ; le terme est déjà employé à cette époque en droit international, avec une acception proche de celle d'aujourd'hui ; *note de l'auteur*), car l'homme ordinaire est laissé sans défense dès lors que l'on accepte qu'une pollution soit admissible jusqu'à un certain seuil, et ne peut donc plus être contestée. Toute pollution est indésirable, et est un coût payé pour l'activité qui la produit. La regarder comme admissible dans le même sens que respirer revient à dégrader nos vies. » [Scorer, 1971 (1), p. 819][313]

En faisant usage du terme « humanité », un orteil est déposé dans le globalisme.

Scorer y pose bientôt les deux pieds : la modification des modes de vie-consommation et la délocalisation des activités polluantes,[314] qui concourent à accroître irrémédiablement les pollutions, ne sont donc pas seulement des phénomènes locaux, mais aussi globaux. Non seulement nous peinerons à maîtriser nos pollutions (urbaines, notamment) en Occident si nous nous en tenons à définir des seuils de pollutions acceptables ; mais, écrit Scorer,

> « nous devons reconnaître que sous peu les problèmes de pollution globale deviendront notre inquiétude principale et que, en ce sens, notre gestion

---

[313] La critique des normes de qualité de l'air à laquelle se livre Scorer est évidemment simpliste, dans la mesure où elle ignore l'autre face, "positive", de cet outil. Ainsi, depuis les années 1970, de nombreux acteurs de la société civile se sont emparés des normes de pollution de l'air, soit pour rappeler aux pouvoirs publics leur responsabilité, soit pour inciter ces derniers à revoir les seuils à la baisse afin de se mettre en conformité avec de nouvelles études (épidémiologiques et toxicologiques, notamment). Des expériences de « science citoyenne » ont même été menées : des mesures « profanes » des pollutions de l'air ont été réalisées, par exemple aux Etats-Unis (certes, toujours très marginalement), afin de suppléer à la trop grande dispersion des instruments de mesure au sol de l'EPA et de ses associés, et donc afin d'imposer "partout", effectivement, les normes de pollution établies [Ottinger, 2010].

Ajoutons que H. Reiquam répondit à la critique de R. Scorer. Il se défendit de vouloir partout laisser s'imposer des taux importants de polluants dans l'atmosphère – « les normes de qualité de l'air n'ont pas vocation à être uniformes partout », écrit-il. Plus étonnant pour le lecteur d'aujourd'hui, Reiquam assura être « tout à fait d'accord » avec la critique de la croissance économique que faisait Scorer, déclarant même, en guise de démonstration : « Qui pourrait se disputer aujourd'hui avec le 'Professor' Scorer lorsqu'il affirme que la tâche urgente actuellement est d'élaborer un mode de vie qui ne dépend pas d'une économie de croissance ? »… Avant de justifier sa collaboration à la mise en place des normes de qualité de l'air par son « pessimisme » :

> « Peut-être suis-je trop pessimiste [… Aussi, jugé-je que, dans le contexte actuel, il faut utiliser tous les leviers à notre disposition.] L'une des choses qui est faite, aux Etats-Unis et ailleurs, est d'établir des normes pour l'air ambiant. Qu'elles soient mauvaises ou immorales, elles existent et doivent être utilisées. [… Et,] si les concentrations [de polluants qui adviennent] sont inacceptables, alors clairement, c'est que les normes (*i.e.* les concentrations autorisées) sont trop hautes, et elles doivent alors être révisées. » [Reiquam, 1971 **in** Scorer, 1971 (1), p. 820]

[314] En ce qui concerne les pollutions locales et régionales dans les villes, sujet que le météorologiste des pollutions Richard Scorer maîtrise parfaitement, B. Prinz avait écrit dans son chapitre du rapport de 1976 pour l'OMS :

> « Il serait aussi désirable, étant donné les fortes pressions économiques en jeu, que ces normes [de qualité de l'air] soient uniformes pour tous les pays lorsque tous les facteurs sur lesquels elles se fondent sont les mêmes [(à l'image des normes de l'US EPA, qui s'appliquent à tous les états du pays)]. Aujourd'hui, l'industrie peut exercer une pression sur les gouvernements en menaçant d'aller s'installer dans les pays voisins où les restrictions imposées pour la protection de l'environnement sont moins sévères. » [Prinz, 1976, p. 59]

Ces phrases auraient pu être écrites par Scorer. (Nous faisons remarquer que, quelques lignes plus loin, Prinz cite Scorer, 1971 (1), qu'il a donc lu [Prinz, 1976, p. 59]).

> des ressources devra être étendue à l'ensemble de l'atmosphère. » [Scorer, 1971 (2), pp. 924]

Deux problèmes globaux pour le prix d'un, donc : la raréfaction des ressources mondiales ; des problèmes, imminents, de modification dangereuse de l'environnement global.

Comme tous ses pairs ou presque au début des années 1970, Scorer reconnaît ne pas pouvoir estimer la dangerosité des émissions fossiles, des fumées et des poussières d'origine anthropique sur le climat global. En conséquence, il ne donne pas d'indication précise sur les réductions de pollution à réaliser.[315] Toutefois, il a la conviction que l'atmosphère est, comme la terre et l'eau, « un bien qu'il faut préserver » sous réserve d'évolutions néfastes de l'atmosphère à grande échelle et à échelle globale, à l'heure où la population mondiale explose. Scorer pense d'abord aux niveaux de pollutions délétères toujours croissants dans la plupart des régions du monde, et à l'éventualité d'un changement climatique global. Il conseille de « nous organiser pour n'avoir qu'une petite partie de l'air à gérer, et à n'en prendre qu'une petite part comme ressource » [Scorer, 1971 (2), pp. 922-927]. Et de conclure, en articulant de nouveau science, technologie et industrie, et politique :

> « Je crois que ceci est une partie de l'héritage de la révolution industrielle dont nous devons nous débarrasser : supposer, et même espérer que l'homme puisse contrôler le monde [(sous-entendu, par la science)... Or, là où] la science cesse de comprendre, la technologie et l'industrie doivent graduellement réduire leur écoulement de matériaux à un niveau où la quantité de terre abîmée, et de mer et air pollués cessent d'augmenter. » [Scorer, 1971 (2), p. 924]

La pensée "politique" de Scorer se présente d'abord comme un constat historique. « Notre place dans l'histoire » se trouverait à la confluence de *trois grands récits globaux* :

(i) D'abord, le récit scientifique du « vivant », qui « a progressivement altéré assez fondamentalement l'environnement physique dans lequel il a vécu ».

(ii) Ensuite, le récit de l'ère industrielle pollueuse et prodigue, qui débute « il y a 200 ans environ », date concomitante, selon Scorer, « de la perte par l'homme de sa peur dans la nature et du début dans sa croyance selon laquelle Dieu avait voulu faire de lui le maître de cette nature ». Les prédicats que le Britannique prête à l'époque industrielle post-1800 ne sont pas sans faire écho aux « techniques de désinhibition » face aux effets délétères du « progrès » qu'a décrites l'historien Jean-Baptiste Fressoz [Fressoz, 2012]. Scorer écrit par exemple que la Révolution industrielle a libéré la « prédation » de l'homme sur le monde – il parle de quelque

[315] En outre, comme nous l'avons dit, Scorer ne croit nullement à l'hypothèse d'une destruction chimique significative de la couche d'ozone par les SST – il le clame déjà haut et fort dans Scorer, 1971 (2), pp. 925-927.

(intraduisible) 'power-driven predation of the world by man'. Puis, le scientifique anglais expose la double révolution, maintes fois théorisée et richement documentée dans Pommeranz, 2009 (et qu'a menée avec le plus d'intensité, au XIX^{ème} siècle, le Royaume-Uni de Scorer) : un pillage de l'environnement des territoires coloniaux (d'"hectares fantômes"), d'une part ; et, d'autre part, une « dépendance entière de la civilisation [occidentale puis mondiale] à une ressource qui sera bientôt épuisée – l'énergie fossile » (puisée d'abord en métropole, dans les mines de charbon). Avec pour corollaire, une "dette écologique" qu'il nous faut payer – puisque « l'Homme de la Révolution Industrielle [… a jusqu'à présent] volé [les richesses] à la postérité », écrit Scorer. [Scorer, 1977 (1), p. 5]

(iii) Enfin, « le vingtième siècle », et plus particulièrement les Trente glorieuses, « où [Scorer et ses contemporains] ont le privilège de vivre », écrit l'auteur sans ironie, seraient le lieu d'une sorte de généralisation et d'accroissement spectaculaire des processus néfastes exposés ci-dessus. Les "Trente pollueuses", comme les ont qualifiées certains auteurs (voir Bonneuil, Pessis & Topçu (dir.), 2013), n'ont-elle pas été, de fait, le théâtre d'un accroissement démographique mondial spectaculaire (au-delà de 20% dans les années 1960 puis les années 1970), d'une croissance globale élevée au rang d'évidence économique, de divers développements techno-industriels aux conséquences parfois funestes (Ex : la « révolution verte » (voir Scorer, 1977 (1), pp. 76-78), l'énergie nucléaire), de ruptures de liens sociaux qui s'étaient montrés aptes à pérenniser les sociétés précédentes, *etc.* ? Mais, parallèlement, pense le météorologiste britannique (ou s'agit-il là d'un simple 'wishful thinking' ?), les années 1950-70 seraient le moment de la réflexivité environnementale, où « l'homme a soudainement saisi l'imminence de la terrible catastrophe au-delà de son contrôle mais de son propre fait » (Nous avons rappelé dans l'Introduction générale que dépeindre la réflexivité environnementale, même globale, comme étant subitement apparue dans les années 1960-70, après deux siècles d'inconscience quant aux processus néfastes que l'homme provoquait, est une contre-vérité.) [Scorer, 1977 (1), "Chapter One. Our place in history", pp. 7-9]

La pensée du global traverse l'ensemble du livre-pamphlet de Scorer de 1977, *The clever moron*. L'auteur britannique y montre une inquiétude particulière pour la dépendance au pétrole et aux énergies fossiles, « ressources » dont la raréfaction le préoccupe plus que tout autre. Dans cet ouvrage, les pollutions locales et régionales sont reléguées au second plan. Scorer en avait exposé un peu plus longuement les possibilités de contrôle dans la première partie du « Chapitre 6. La vision moderne de la pollution de l'air et de l'eau » de son rapport de 1972 publié par le Parti libéral anglais, qui était destiné à un

public exclusivement britannique [Scorer, 1972 (1), pp. 25-27]. La question du changement climatique dont pourraient être responsables les émissions de CO_2 n'est abordée dans aucun de ses deux ouvrages (Scorer, 1972 (1) ; Scorer, 1977). Certes, les menaces inhérentes au changement climatique sont prises au sérieux par Scorer dès les années 1970. Mais, dans la mesure où aucun consensus scientifique ne se dégage encore sur la question, Scorer insiste sur la raréfaction des ressources fossiles globales… Un sujet qui trouve au cours de la décennie 1970, pour la première fois, une caisse de résonance importante, à la faveur des chocs pétroliers.

Scorer fait un usage parcimonieux des métaphores de type "contamination de l'environnement" et des métaphores médicales. Le monde et l'environnement global ne sont pas "malades"… Ils n'en courent pas moins à la catastrophe ! En effet, la destruction de la couche d'ozone et le changement climatique (s'ils devenaient avérés), de même que les pollutions régionales (la pollution des villes, les pluies acides, la pollution des eaux et des sols), ne seraient que la face émergée de l'iceberg. Aussi néfastes soient-elles, ces manifestations restent des méta-phénomènes. De quoi témoignent-ils ? Selon Scorer, de *la victoire d'un système, d'un dogme, d'un modèle macroéconomique*, qui a prolongé une logique consumériste, pollueuse, enclenchée au XIX^{ème} siècle, et l'a transformée tout en la radicalisant dans les années 1960-1970. Ce modèle macroéconomique se caractérise notamment par un système d'échanges (et de dettes !) entre pays du monde entier, et par le dogme de la croissance (voir plus loin). Il tend à donner le visage d'un monde plein, tout près d'atteindre ses limites.

Scorer écrit :

> « [D]e manière assez littérale, nous construisons notre nid sur une branche que nous coupons afin de le construire. Telle est la précarité de notre monde. La drosophile nourrit plusieurs générations sur une banane pourrissante, et lorsque celle-ci est entièrement mangée, sa progéniture s'envole vers une autre pour la coloniser. Nous, néanmoins, n'avons qu'une seule banane. » [Scorer, 1977 (1), p. 10]

Ainsi, au récit allégorique mais « presque littéral », écrit-il, de la *catastrophe* du nid destiné à se fracasser au sol sans possibilité de retour en arrière, répond la fable du *monde plein*, dont presque tous les territoires utiles à la prospérité de l'homme ont été colonisés, et vidés de leurs attributs régénérateurs[316] et de leurs ressources, nous laissant *un* unique monde, bientôt insuffisant à la prospérité humaine (même avec des hommes faisant preuve de la meilleure

[316] Scorer écrit : « les forêts, les déserts et les étendues de glace fournissent un vaste réservoir de vide ('a vast reservoir of emptiness') dans lequel notre air peut recouvrer sa pureté naturelle » – en plus d'être des lieux où nous pouvons « remplir nos esprits dans le respect de la nature ('in awe of nature') plutôt que dans la proximité oppressante de notre propre multitude ('oppressive proximity of our own multitudes') ». [Scorer, 1971 (2), p. 924]

volonté et d'un grand altruisme… hommes dont Scorer déplore la rareté). La métaphore du monde plein est omniprésente dans *the Clever Moron* (1977), tout comme elle l'était déjà dans les grands récits des Limites du début des années 1970, que ce soit le Rapport du Club de Rome (1972) ou le rapport officieux de l'UNCHE de 1972, *Nous n'avons qu'une terre*. Et, comme ceci est fait dans ces deux derniers ouvrages, Scorer appelle à reconsidérer l'injonction à la croissance, qui serait devenue un dogme nous éloignant des réalités matérielles, des besoins premiers de l'humanité, menacés à moyen terme.[317]

De fait, Scorer inscrit son constat d'échec des politiques environnementales *principalement* dans un récit d'évolution vers une économie *ultralibérale (globalisée)* ; mais, sa critique tourne principalement autour d'une notion qui n'est pas propre au libéralisme : la *croissance*. Dans son rapport (à tendance quelque peu pamphlétaire) de 1972, publié par le Parti libéral anglais,[318] la remise en question de la « *croissance économique* » y est déjà présentée comme une option nécessaire ; Scorer déclare notamment : « nous savons tous que la croissance [économique] doit s'arrêter » [Scorer, 1972 (1), titre & p. 8]. Toutefois, il insiste particulièrement sur un type particulier de croissance, celle qui consomme des ressources fossiles (il écrit ailleurs : « *ce genre de* croissance (plus de consommation de carburant [fossile]) ne peut guère continuer à être bénéfique à l'humanité beaucoup plus longtemps, du fait de [l'augmentation de] la population et de l'épuisement des ressources » [Scorer, 1972 (1), p. 4 ; *c'est nous qui soulignons*]. Son texte de 1972 s'attaque en effet presque exclusivement à la croissance de la consommation des ressources fossiles. Et, Scorer y propose avant tout des aménagements à base de taxes sur ces dernières (qu'il entend concilier avec l'avènement d'une société plus égalitaire).[319] Avant d'ajouter, en forme de menace – menace que l'homme du début des années 2010 reçoit avec une résonance toute particulière : « Mieux vaut planifier ce changement maintenant qu'y être contraint plus tard en désespoir de cause. » A

---

[317] Précisons toutefois qu'il ne s'agit pas, pour les auteurs de *Nous n'avons qu'une terre*, d'assimiler de manière nécessaire la croissance et les limites environnementales. Voir Ward & Dubos (Dir.), 1974 (2), « Chapitre 11. Une politique de la croissance », pp. 293-340.

[318] Bien que destiné à un public britannique, le rapport de 1972 de Scorer, intitulé *A Radical Approach to Pollution, Population and Resources* et commandé et publié par le Parti libéral anglais, entend, non seulement pointer du doigt les dégâts environnementaux nationaux d'un modèle d'économie-monde, mais aussi démontrer les *contradictions systémiques* (à l'échelle globale, principalement) entre « pollution, population et ressources » telles que les produit ou les consomme l'ère industrielle (et en particulier depuis les Trente glorieuses). [Scorer, 1972 (1)]

[319] Scorer écrit :

> « Notre présente prospérité a été produite par une société qui s'est délibérément donnée des perspectives de gain ('incentives') […] par l'utilisation de toujours plus de carburant [fossile]. Toutes nos perspectives de gain et tous nos projets doivent [à présent] être repensés. Ceci signifie que notre système de taxes doit être complètement réaménagé […, notamment en transférant] le fardeau de la taxe des salaires individuels sur le carburant [fossile]. [… Puis,] doit être réduit le salaire nominal des hauts revenus, et l'impôt sur le revenu abrogé [pour tous]. Dans les faits, la facture de combustible et de matières premières des entreprises augmentera beaucoup en moyenne, [mais] leur masse salariale diminuera. Ceci ne pourra advenir qu'à la condition que nous donnions une place plus importante au développement, dans nos consciences, d'idéaux d'une société égalitaire, où une personne est une, et une seule, et doit être traitée comme telle. » [Scorer, 1972 (1), "Epilogue : Human Values in a Full World", p. 32]

cette mise en garde répond, dans le pamphlet de 1977, la sentence suivante : « La misère évitée aujourd'hui par l'abondance ('by affluence') a été seulement différée et quantitativement élargie. » [Scorer, 1972 (1), "Epilogue : Human Values in a Full World", p. 32 ; Scorer, 1977 (1), p. 33]

Alors que le rapport *A Radical Approach to Pollution, Population and Resources* de 1972 s'en tenait presque exclusivement à un réquisitoire contre la dépendance croissante à une énergie fossile en raréfaction,[320] le pamphlet *the Clever Moron* (1977) sonnera comme une dénonciation de la croissance économique *en général*. Une section est même intitulée : « plus rapide sera la croissance [économique], plus soudaine sera la pénurie ('dearth') » [Scorer, 1977 (1), p. 33]. Scorer y démontrera la thèse logique (qui est loin d'être originale, bien sûr !, surtout dans le contexte du début des années 1970) :

> « croissance [économique] exponentielle dans un monde fini »,
>
> DONC (« conséquence inexorable »)
>
> « après une courte période d'un point de vue historique », « pénurie ('dearth') exponentielle », « inflation », et « l'inversion de toutes les valeurs générées par la vue de l'abondance, vers une permanente économie de guerre ('permanent siege economy') marquée par la peur de la pénurie. » [Scorer, 1977 (1), pp. 132 & 160]

Et, le Britannique de distinguer son récit des dystopies qui ont proliférées depuis 1945, et même le début du XX^{ème} siècle :

> La « catastrophe, n'est pas due au fait que [l'homme] s'autodétruirait dans les guerres ou dans la servitude aux machines, comme l'ont souvent proclamé les prophètes du début du vingtième siècle, mais au fait qu'il a dépassé les bornes et rendu sa civilisation entièrement dépendante d'une ressource qui sera bientôt épuisée – le combustible fossile. [...] 1984, continue-t-il, sera une version paupérisée ('an impoverished version') de 1964, un monde de rébellion, d'hystérie et de désordre, et non un monde dans lequel la technologie fabrique des dictateurs puissants, ni un monde dominé par les complexités ('intricacies') de la science. Il sera obsédé par l'obtention d'un *modus vivendi* avec les menaçantes limitations d'un monde plein ('It will be obsessed by coming to terms with the fearful limitations of a full world.'). » [Scorer, 1977 (1), p. 9]

« Le vingtième siècle, notre siècle, écrit Scorer, est un moment unique dans l'histoire, parce que climatérique pour l'humanité. Dans le passé, les civilisations se sont élevées puis ont

[320] Dans le rapport de 1972, la croissance de la consommation des énergies fossiles est certes une composante nodale aux yeux de Scorer, mais *pas l'unique* surconsommation dénoncée. Scorer parle d'une plus générale « exploitation des ressources énergétiques naturelle », et plus largement des mécanismes pollueurs et "non-durables" qui permettent la production de « richesse » dans les sociétés du « capitalisme individualiste » comme les pays communistes. [Scorer, 1972 (1), p. 8]

chuté chacune à son tour, mais jamais l'humanité entière n'a été menacée par une défaillance ('failure') soudaine de son mode de vie, par des privations désastreuses, et par la possibilité réelle de régression dans les domaines de la morale, de la liberté, de la tolérance, de l'hygiène et de nombreux autres attributs de notre civilisation que nous sommes fiers d'avoir atteints, mais que nous avons atteints par l'abondance ('affluence') et une prodigalité excessive ('awful extravagance'). » [Scorer, 1977 (1), pp. 9-10]

L'ennemi numéro un : l'économiste

A en croire Richard Scorer, tous les hommes de 1972 « s[avaient] que la croissance [économique] d[evait] s'arrêter ». Aussi, pourquoi est-elle au contraire encouragée dans les politiques nationales de l'ensemble des pays du monde en 1972, puis encore lorsque Scorer rédige son *The clever moron* (1977) après l'avènement d'un premier choc pétrolier synonyme de crise économique (1973) ? Ou plutôt : par qui est-elle encouragée ? Scorer condamne un système que *la grande majorité des citoyens* encouragent pour leur confort personnel immédiat. Mais, il désigne également deux catégories de fautifs au pouvoir politique plus large et plus prégnant. D'une part, « les gens aux postes à responsabilité », *des « politiciens »* qui sont obnubilés par le résultat des prochaines élections, ne sont pas « représentatifs d'un public large » (ou plutôt, de sa diversité), et adhèrent à des discours d'économistes envoûtants. [Scorer, 1977 (1)]

D'autre part, cela va de soi, Scorer pointe du doigt lesdits « *économistes* » qui susurrent à l'oreille des décideurs politiques. « Les économistes », comme il les désigne simplement la plupart du temps, constituent la cible numéro un du pamphlet de 1977. La « religion de l'économie », que Scorer résume presque exclusivement à une politique de « croissance », est un processus destructeur : d'abord mise en œuvre en « Europe, en Amérique du nord et au Japon », puis « plus récemment dans d'autres pays », écrit-il, elle « a submergé de nombreuses autres cultures [qu'elle] a détruites par son pouvoir, rendant des communautés viables inaptes à la survie. Elle a engendré de l'inflation, si bien que [ces cultures auparavant viables sont] dev[enues] entièrement dépendantes du système de l'ouest. » Enfin, le chômage et l'inflation se sont répandus dans les deux types de pays (à l'Ouest et dans les pays "en voie de développement"), non seulement à cause de la généralisation d'une économie concurrentielle globalisée et avec des droits du travail et des salaires disparates, mais avant tout, affirme Scorer, car les « ressources ont été utilisées trop rapidement » et parce que « l'économie de la croissance a provoqué une croissance rapide de la population ». Avant de conclure :

« Ainsi, nous voyons à présent le commencement d'une économie de guerre ('siege economy')[321] et le début d'une inflation des pénuries. Ce point de vue est, bien sûr, en désaccord avec la théorie économique conventionnelle, mais je n'ai aucun scrupule à ce sujet, ne serait-ce que parce que les économistes sont en désaccord les uns avec les autres. » [Scorer, 1977 (1), pp. 2-3][322]

Selon Scorer, le pouvoir des économistes est adossé à un double mensonge :

- un « idéalisme » sur leur capacité réelle à modéliser l'économie – parfois, comble de la bêtise, « par ordinateur » –[323], ainsi qu'à gérer l'inflation (aussi, d'après Scorer, ils s'agiteraient, surtout, ils chercheraient à "mobiliser" – pour utiliser une sémantique qui fait écho à l'usage du terme « économie de guerre ») ;

---

[321] Le concept anglais 'siege economy' est traduit en français par « économie de siège », « économie autarcique », « économie protectionniste », « économie de guerre », *etc.* Il est souvent traduit en portugais par 'economia de guerra', en italien par 'economia da stato d'assedio', en espagnol par 'economía de sitio'. Nous avons privilégié le groupe nominal « économie de guerre », qui rend compte de la tonalité belliqueuse du discours de Scorer, que marque en anglais le terme 'siege' (littéralement « siège », dans son sens belligérant). « Economie de siège » aurait également convenu, mais son occurrence est rare, les francophones lui préférant « économie de guerre » ou « économie protectionniste ». Or, les deux concepts ne sont pas toujours synonymes… L'économie que promeut Scorer est, à bien des égards, protectionniste !

[322] La citation est intéressante car elle nous conduit vers la problématique de l'expertise, que nous examinons plus loin. Toutefois, elle est également révélatrice des limites de l'analyse de Scorer : ses références vagues à quelque consensus, ou à quelque dissensus scientifique ; et surtout, son esprit excessif de généralité, en particulier en termes de catégorisation sociologique… Les catégories sociales qu'utilise Scorer sont en effet souvent des plus discutables. C'est vrai lorsqu'elles sont des disciplines académiques (« les économistes », « les chimistes », « les scientifiques [de la nature] », *etc.*). C'est également vrai lorsqu'il s'agit de mouvements marginaux ou de "tribus postmodernes" (comme certains les désignent aujourd'hui). Ainsi, ce laïus de Scorer – où il se positionne, soulignons-le, comme celui qui détient la raison –, tirade dont les catégories sociologiques ne manqueront pas de laisser le lecteur perplexe (on pourrait, bien sûr, comprendre les attributs que Scorer leur donne dans le contexte anglais post-68, mais les dénonciations de Scorer n'en sont pas moins – justement – à courtes vues, n'en sont pas moins des poncifs) :

> "While the success of IRM [(Industrial Revolution Man)] was being organised by the politicians of the twentieth century, small bands of starry-eyed idealists who contrasted their humble and loving outlook with the grasping 'materialism' of IRM and called themselves pacifists, socialists, Luddites, vegetarians, teetotallers, humanists or Christians, were preaching in a puritanical way that excess was wicked, that everyone should have a cold bath before breakfast, that man should never kill a fly, that to make animals perform in a circus was evil, that you must let the Lord Jesus into your heart and read the scriptures for wisdom. They were joined by hedonists, anarchists and other suspect libertarians who wanted to abolish practically everything, raze the whole edifice to the ground and let out the human spirit the breathe the fresh air and have unlimited sex or blow up the nearest symbol of the establishment. This rabble of utterly conflicting viewpoints arose because the technological success of IRM was regimenting and indoctrinating humanity with its mottoes, 'Enough shall never suffice' and 'Without growth you die' (meaning, of course, economic growth).
>
> "Each little minority had glimpsed the contradiction between the reality of the world and the ideals of IRM, and foresaw its own version of catastrophe on the horizon. Simple-minded they all were, and all their visions were mirages, but they were right in their premonitions." [Scorer, 1977 (1), pp. 159-160]

N.B. :

> "[As for] economists [they] are starry-eyed idealists, like philosophers and theologians of a time that has now become irrelevant." [Scorer, 1977 (1), p. 3]

[323] Les modèles à scénarii "couplant science de l'atmosphère globale et économie (principalement)" ne deviendront des outils pour les politiques environnementales qu'au cours des années 1980. Néanmoins, les macro-économistes font un usage croissant des modèles numériques dès la fin des années 1960. Nous pensons notamment aux modélisations globales du Club de Rome, dont les résultats furent publiés dans le célèbre rapport *Limits to Growth* (1972). Scorer ne les cite jamais. Ceci est révélateur de son mépris des modèles. Car, par ailleurs, le texte "environnementaliste" *A Blueprint for Survival* qu'il signa en 1972 s'appuyait explicitement sur les résultats d'expertise du Club de Rome [*Ecologist (the)*, 1972, "preface"].

- un récit trompeur qui leur permet d'usurper aujourd'hui les mérites des progrès de la Révolution industrielle. Or, ces derniers reviendraient pourtant de droit aux développement de l'industrie, aux « technologistes ('technologists') », comme les nomme Scorer, et non aux économistes.[324] [Scorer, 1972 (1), pp. 8, 4-6 & 12 ; Scorer, 1977 (1), pp. 2-5]

Nous le voyons, Scorer résume presque exclusivement la « religion de l'économie » à une politique de « croissance ». Bien que Scorer vitupère principalement contre les économistes libéraux, son constat d'échec n'épargne pas non plus les Etats socialistes, dont la prospérité n'est nullement assurée non plus. Dans son rapport de 1972, Scorer avait écrit :

> « les grands problèmes de notre temps sont globaux, et ne sont pas particuliers à un système politique plus qu'un autre. Clairement, certains pays se sont engagés plus que d'autres dans les excès de l'Homme de la Révolution Industrielle, mais aucun n'a encore fait plus que chercher à éviter les conséquences immédiatement néfastes. Même les Chinois, qui se sont attaqués à la croissance excessive des villes avec un succès louable, ne nous offrent toujours pas une solution générale » [Scorer, 1972 (1), p. 7].

Cinq ans plus tard, le Britannique renvoie clairement dos à dos « Capitalisme et Marxisme [, accusés de s'être] donné la main pour violer la terre », en défendant « les méchantes absurdités de la philosophie de la croissance » (globalisée) [Scorer, 1977 (1), pp. 18-21].
Nous ne savons quel enseignement tirer du fait que Scorer ait été un membre du 'Labour Party' (et même candidat au Parlement sous cette étiquette politique) dans les

---

[324] Scorer écrit en effet :

> "The scourge of unemployment has been spread to every corner of [the economical] empire [of "the west"], and because its more successful sections have not suffered from the inflation the 'theologians' [*i.e.* the economists] have inverted the cause and effect relationship: they say that inflation is due to the backwardness of economies in places where it occurs: actually it is directly due to the occurrence of growth elsewhere and the forcible linking of the two economies."

Et un peu plus tôt :

> "In recent years, the economists took over the technologists who had built the roads, buildings, machinery and vehicles, all the heavy hardware which did the work – and were turning their attention to computing and organisation. Technologists had led the way forward by providing the equipment: they had made themselves the servants of our welfare. The economists invented a new kind of theology for it all. The economists invented a new kind of theology for it all. When everything became so complex that each technologist could only see his little bit of the whole machine at all clearly, the economists claimed to tell us how it all fitted together, how trade and social evolution worked, and how we should ensure continued progress. They told us how the great leap made it flow, and how new enterprises were organised. They have been telling us that the organisation of the economics was what caused it all to happen, and they have been telling us more recently that anything else we need can be made to happen by putting the economics forces to work to drive it that way.
>
> "The religion of economics has now proceeded to the point where technological inventions are thought of as having been caused by the economic situation, and the discoveries of prospectors have been stimulated by the economics needs of growing societies." [Scorer, 1977 (1), pp. 2-3]

années 1970… En tout cas, ses écrits indiquent que, bien qu'il eût publié dans la revue *Socialist Commentary* (*cf.* Scorer R.S., 1971, "The environment: an impending catastrophe" (April 1971)), nous ne saurions qualifier de « socialiste » son idéologie, comme le fit une critique de presse britannique à la sortie de *the Clever Moron* [Scorer, 1977, « Quelques critiques de la presse », 4ème de couverture].[325] En fait, même dans ce pamphlet, Scorer ne se réclame jamais du « socialisme ». Bien que profondément anticlérical et pourfendeur du capitalisme immoral qu'il voit prospérer, et montrant par ailleurs une sensibilité égalitariste et internationaliste, Scorer ne se présente pas comme socialiste, moins encore comme « communiste marxiste » [Scorer, 1977 (1), p. 138]. Certes, son Grand récit le conduit, *mais à une unique reprise*, à appeler de ses vœux une « forme plus avancée du socialisme », qui se substituerait au capitalisme adepte du « 'laissez-faire' »…[326]

La pensée de Richard Scorer transcende le clivage entre socialisme d'Etat et capitalisme d'Etat. Scorer entend substituer au socialisme autoritaire et au libéralisme une "troisième voie", anti-productiviste, démocratique et "décroissantiste" (comme nous la désignerions aujourd'hui). Une voie qui fait la part belle au "local". "Of course small is beautiful!", s'écrie-t-il dans *the Clever Moron*, pour faire l'apologie des petites communautés humaines, aptes selon lui à assurer au mieux leur prospérité et leur liberté d'action, ainsi qu'à limiter les impacts environnementaux. Son ouvrage est en effet un plaidoyer sans cesse renouvelé pour la diversité de projets humains "à taille humaine", c'est-à-dire à un niveau où la démocratie est la plus patente et le sentiment d'appartenance à un collectif le plus fort, selon lui [Scorer, 1977 (1), p. 164]. La proximité avec le *Small is beautiful* d'Ernst Friedrich Schumacher (1973) est frappante. Leurs "décentralismes" sont semblables (et, chez les deux auteurs, à la décentralisation nationale répond une "décentralisation globale" postcoloniale). On trouve cette même injonction à relocaliser chez les auteurs de *Nous n'avons qu'une terre*, qui appellent à repenser en ce sens « la mobilisation des ressources », dans les pays développés comme les pays en développement [Ward & Dubos, 1974 (1972), pp. 328-339].

En outre, la critique des technologies de Scorer répond à "un principe de réalité" qui semble mal intégré par les politiciens : on ne saurait construire une société sur la base de

---

[325] Sur la quatrième de couverture de *The Clever Moron*, la critique de presse britannique Stephanie Lenz présentait ainsi l'ouvrage de Scorer :

> "It is a realistic approach, from a socialist viewpoint, to the problem of air pollution, which, although he has written a book about it, the author repeatedly states is not as serious a problem as the scaremongers make it out to be. [… As for] real problem of air pollution […,] there is little that can be accomplished without revolutionary changes in the present political and economic system." (Stephanie Lenz, *Time Out*) [Scorer, 1975, « Quelques critiques de la presse », 4ème de couverture]

[326] Scorer, 1977 :

> "Actually what we are led to is a more advanced form of socialism. Capitalist (i.e. old-fashioned) *laissez-faire* was to some extent tolerable as long as its field of operation was only a small fraction of the world. In Britain in 1840 it was already producing conflicts in the control of land as enterprising people started to build railways and interfered with farms and estates. Today, *laissez-faire* only exists for the very powerful few". [Scorer, 1977 (1), p. 55]

technologies qui n'existent pas encore ![327] Elle doit également être corrélée à ce désir, partagé avec E.F. Schumacher, d'économie à taille humaine, d'indépendance politique, de démocratie. Scorer entend, en particulier, lutter contre le scientisme et la technophilie hystérique de son époque. La section conclusive du pamphlet de 1977 s'intitule « le pire danger est le succès ». La dernière saillie va au « développement de l'énergie de fusion », dans lequel « certains voient le sommet du succès […, qui] « résoudrait tous nos problèmes » »… Scorer songe-t-il alors à Lovelock ? [Scorer, 1977 (1), p. 166]

Scorer se présente comme un anti-productiviste et antitechnologiste *modéré*… Toutefois, son rejet du néo-luddisme s'atténuera entre le "rapport-pamphlet" de 1972, où il dénonçait « le lobby anti-technologie, nos Luddites modernes [qui s'attaquent] parfois à des cibles mal choisies » (*cf.* par exemple leur cabale contre le Concorde), et le pamphlet de 1977, où les Néo-Luddites sont certes des « simples d'esprit » mais « leurs prémonitions sont bonnes ». De plus, à l'inverse des « économistes », les Néo-Luddites « veulent seulement voir les machines s'arrêter de travailler, pas les gens. » Or, le plus important aux yeux de Scorer est que les gens travaillent ! Et, de la sorte, qu'ils s'insèrent dans un tissu social "robuste", "cohérent" et "résilient". Là encore, les propos de Scorer entrent en résonance avec *Nous n'avons qu'une terre*, ouvrage dans lequel est omniprésente la recherche des combinaisons optimales entre moindre pollution, modernisation technologique et forte intensité de main-d'œuvre, que ce soient pour les pays en développement ou pour les pays développés. [Scorer, 1972 (1), p. 3 ; Scorer, 1977 (1), pp. 160-166 ; Ward & Dubos, 1974 (1972)]

On retombe ici sur la critique *sociale* de Scorer. Elle se double d'une critique *morale* (voire, parfois, *artiste*). Scorer expose en fait les conclusions portées par de multiples courants critiques de son époque. Il recherche une "troisième voie", non aveuglément technophile et productiviste-consumériste,[328] en rappelant que la politique devrait avant tout être choix de

---

[327] Dans son rapport de 1972, Scorer écrivait :

> « [J]amais une situation n'a existé auparavant, dans laquelle des politiques ont été menées suivant l'hypothèse que des technologies encore inconnues seraient [bientôt] découvertes pour satisfaire les souhaits des décideurs politiques. L'état d'esprit qui se trouve contenté par une telle dépendance inhibe en fait toute sorte de planification pour le futur ; car, qui peut planifier une société dominée par une technologie qui n'a pas encore été inventée ? Que nous comptions fortement ou non sur l'avancée scientifique, il n'y a guère de raison de douter qu'une nouvelle technologie altérera notre façon de vivre. La question est : altérera-t-elle nos relations humaines de manière satisfaisante ou induira-t-elle de nouveaux conflits ? » [Scorer, 1972 (1), pp. 4-5]

Dans *the Clever Moron*, Scorer s'attaquera à l'enthousiasme excessif pour le « succès technologique ». Il ciblera en particulier les "fausses solutions (miracles)" empruntées à l'ingénierie, avancées jusqu'alors pour résoudre la question de la raréfaction des ressources fossiles. Scorer dénoncera le *« technological fix »* des politiques menées, comme en attestent certains intertitres du « Chapitre 3. Succès technologique » de l'ouvrage : « le succès technologique est trop souvent un 'technological fix' » ; « le plus important des 'technological fixes' a été l'esquive de réforme sociale par une nouvelle série de petits cadeaux ('another round of goodies') » (*i.e.* de « biens consommables […] procurés par des avancées dans le domaine des technologies, ou par une consommation accrue de ressources fossiles ») ; « la perspicacité est bloquée par l'hypothèse que le salut viendrait de quelque avancée technologique » [Scorer, 1977 (1), pp. 57-85].

[328] Le critique de presse C.N. Davies écrivait ainsi, en guise de présentation à *the Clever Moron* :

valeurs "non scientifiques", non simplement "comptables" (voir les deux dernières sections). [Scorer, 1977 (1) ; Scorer, 1972 (1), p. 33]

Le principe de précaution, un nouvel « évangile » à combattre

Comme nous l'avons montré dans le Chapitre 4, des scientifiques étaient parvenus à susciter une urgence politique autour de la possibilité de destruction de la couche d'ozone, en 1970-71 puis en 1974-75, malgré le déficit de mesures et les grandes incertitudes sur les résultats fournis par les modèles numériques. Ainsi, en 1975, Michael McElroy admettait que « tous ces modèles n'étaient rien d'autre que cela – des modèles. Bien qu'ils soient basés sur ce que nous croyons être un bon travail, la chimie atmosphérique est très difficile et il est facile de manquer quelque chose. Des mesures directes doivent [par conséquent] être entreprises à une allure très accélérée » pour tester les modèles, prescrivait-il. *Toutefois*, le physico-chimiste des atmosphères planétaires maintenait dans la foulée que l'alerte était trop grave pour que l'on puisse se risquer à attendre des confirmations multiples, dans un processus de recherche de dix ans, comme on le faisait à l'accoutumée :

> « La situation est différente de la plupart des types de science [...], où un article théorique demeurera "assis sur une étagère" jusqu'à ce qu'il soit confirmé. Nous ne pouvons pas nous permettre d'attendre les 10 ans habituels. [...] Parce que si les théories sont correctes, d'ici là, les effets observés seront déjà prononcés. » [McElroy, 1975 **in** *Science News*, 1974(1), p. 213]

L'objectif, qui fut atteint, était de faire de la destruction de la couche : la catastrophe atmosphérique par excellence, à la fois plus grave que les pollutions de l'air régionales en matière d'impacts (sanitaires) à court terme, et plus urgente que le changement climatique. Pour cela, il fallait sauver au mieux les apparences au sujet d'une science de l'ozone très embryonnaire, et convaincre les pouvoirs politiques de suivre un principe de précaution.

Comme l'a montré Karen Litfin à l'aide des travaux de Lydia Dotto et Harold Schiff (Dotto & Schiff, 1978), du journaliste d'investigation et romancier Paul Brodeur, et du spécialiste en droit de l'environnement Daniel Bodansky : en 1974-78 aux Etats-Unis, le principe de précaution pour la destruction de l'ozone ne fut pas brandi uniquement par les

---

> "In spite of his rejection of prophecies of doom he lashes out at industrialists, accountants, politicians, even housewives, whose complacency with material security, if not amended, will make a major catastrophe inevitable. Our economic life is linked to growth but the world is nearly full and anarchy is not far away." (CN Davies, *the Times Higher Education Supplement*) [Scorer, 1975, « Quelques critiques de la presse », 4ème de couverture]

Dans *the Clever Moron*, Scorer nous gratifie de nombreux apologues, autres que ceux de la banane et du nid cités plus haut. Ils côtoient des aphorismes, dont beaucoup relèvent d'une *critique sociale* ou d'une *critique artiste* (*cf.* Boltanski & Chiapello, 1999), voire mêlant les deux. Exemples : « Les riches servent à multiplier les aspects les plus bas de notre culture » ; « les consommateurs de masse ne sauraient contribuer à l'évolution » [Scorer, 1977 (1), pp. 150 & 131].

"protecteurs de l'environnement les plus radicaux".[329] Dans les années 1970, de grandes figures des sciences de l'atmosphère et l'opinion états-uniennes, et dans une moindre mesure leurs homologues européennes, étaient prêtes à croire à des risques environnementaux globaux et invisibles (insensibles) tels que la destruction de la couche d'ozone par les avions supersoniques ou les CFC, et à s'en émouvoir. Alors que l'alerte à la destruction de l'ozone par les avions supersoniques a été lancée en 1970-71, elle figure quelques mois plus tard seulement dans la liste des potentiels risques environnementaux globaux d'origine anthropique du rapport officieux *Nous n'avons qu'une terre* (*Only One Earth*), publié en marge de la "Conférence des Nations Unies sur l'Environnement Humain" (UNCHE, Stockholm, 1972). Si leurs auteurs adoptent un ton circonspect, le « bouclier » d'ozone est toutefois bel et bien devenu un bien commun en instance de patrimonialisation universelle, et les avions supersoniques, des pollueurs potentiellement très néfastes. Et, Ward, Dubos et leurs collègues ne s'étonnent pas d'avoir vu certains scientifiques brandir le principe de précaution au sujet des SST en 1971 [Ward & Dubos (Dir.), 1972, pp. 367-368].[330]

Dans le même temps, R. Scorer s'oppose fermement à ce principe, autant pour contrer une peur de destruction anthropique de l'ozone qu'il jugeait déraisonnable, que par crainte que

---

[329] Dans son ouvrage de 1994 auquel nous faisons ici référence, Karen Litfin ne s'attarde pas sur la période 1974-1978. Toutefois, elle donne des éléments qui tendent à montrer que, *sur la question de la couche d'ozone*, le "principe de précaution" ne fut pas l'apanage des "protecteurs de l'environnement les plus radicaux" de la communauté scientifique :

> "Rowland and Molina soon discovered that the photochemistry was more complicated than they had originally believed. […] They concluded that previous estimates of ozone destruction were too high, leading some to accuse the scientists of alarmism (Dotto and Schiff 1978:255). The new discovery prompted the National Academy of Sciences to postpone the release of its final report for several months. The report, reflecting the new data, cut the estimate of ozone depletion in half, from 14 percent in an early draft to 7 percent. […] Despite the [NAS'] indecisiveness in its 1976 report, Russell Peterson, chairman of the President's Council on Environmental Quality declared that "we cannot afford to give chemicals the same constitutional rights that we enjoy under the law; chemicals are not innocent until proven guilty" (Brodeur 1986:74). Considering that he had been a Du Pont chemist for over twenty years, his request that federal agencies develop plans to regulate CFCs was remarkable. Peterson's voice was added to an emerging environmental policy discourse premised on what has come to be known as the "precautionary principle," i.e., that, in the face of scientific uncertainty, regulators should act to prevent harm rather than wait until damage occurs (Bodansky 1991)." [Litfin, 1994, chapter 3, pp. 9-10]

Sur l'utilisation du principe de précaution postérieurement à l'alerte au trou de la couche d'ozone (1985), à présent, nous renvoyons au Chapitre 7, dans lequel nous citons les analyses détaillées de Litfin, 1994 sur le sujet.

[330] Dans l'unique développement du rapport faisant référence à la (très jeune !) problématique de la destruction anthropique de l'ozone stratosphérique, les auteurs écrivent :

> « On a aussi suggéré que les nitrates et les sulfates en provenance des volcans – ou des gaz d'échappement des avions supersoniques – pourraient […] priver l'atmosphère supérieure d'un des éléments essentiels qui constituent le bouclier antiradiations de la planète. »

Le « bouclier » d'ozone est donc un bien commun en instance de patrimonialisation universelle, et les avions supersoniques, des pollueurs potentiellement très néfastes à la planète. Ward et Dubos ne s'émeuvent pas de voir certains scientifiques brandir le principe de précaution, au contraire. Ils écrivent :

> « Soit dit en passant, c'est précisément cette incertitude relative aux effets accumulés du gaz carbonique, des particules de matière, de la vapeur et des gaz dans l'atmosphère qui a conduit certains savants à préconiser une extrême prudence dans le développement massif des transports supersoniques. » [Ward & Dubos, 1972, pp. 367-368]

l'"épidémie de précaution" ne se propage. Il ne se limite pas à dénoncer les alertes trop promptes des Johnston, Molina, Rowland, McElroy, *etc.*, quelques mois seulement après la formulation d'hypothèses nouvelles sur l'ozone stratosphérique ; il voit dans le principe de précaution une arnaque, à laquelle nous adhérons par oisiveté et goût du confort :

> « Il est plus facile de souscrire à un principe négatif qui ne dérange pas nos vies personnelles, plutôt que de faire l'effort nécessaire pour encourager une réforme positive ('to make the effort required to support positive reform') ». [Scorer, 1975, p. 702]

Scorer voit même dans le principe de précaution une nouvelle « évangélisation ('evangelism') pour contenir les excès [humains] », qu'il faut combattre. Dans son style caractéristique, il écrit en 1975 (dans *New Scientist* !) :

> « Depuis [la révolution industrielle,] il est apparu comme un fait évident [« que dieu avait confié la charge du monde à l'homme »,] et les gens sont inquiets des dangers que nous pourrions nous attirer à présent que dieu n'est plus le responsable suprême [du monde]. Ils cherchent une manière d'évangéliser pour contenir les excès, et quand Billy Graham [(prédicateur états-unien du mouvement évangélique)] ne lance pas d'appel, ils inventent une nouvelle éthique. La dernière en date est que nous ne devrions pas prendre un risque si les effets nuisibles sont prédits scientifiquement, à moins que nous puissions réfuter la théorie en question ('we should not take a risk if harmful effects are predicted scientifically unless we can disprove the theory in question'). [...] C'est comme pour l'église, qui exige que nous devrions croire un miracle sur les bases des dires d'un nigaud, sous prétexte que personne n'a prouvé qu'il soit jamais advenu. [...] La situation actuelle [au sujet des CFC] ne ressemble peut-être pas à cela maintenant, mais plus tard, [l]es affirmations [récentes des lanceurs d'alerte sur les CFC] sembleront aussi stupides ('silly') que la peur originelle au sujet des SST [en 1970-71]. » [Scorer, 1975, pp. 702-703]

Précisons que l'idée selon laquelle le capitalisme industriel s'accompagnerait d'un néo-conservatisme est récurrente chez Scorer ; il ne la dénonce pas uniquement à travers l'usage croissant du principe de précaution dans les années 1970.[331]

---

[331] La *complémentarité idéologique* d'un *libéralisme* économique *se présentant comme* "flexible" *et* d'un *néo-conservatisme* "garant de l'ordre moral" sera, plus tard, démontrée à maintes reprises pour la période de domination du néolibéralisme, qui se déploie à partir des années 1980 depuis les Etats-Unis de Reagan et le Royaume-Uni de Thatcher, voire pour les périodes antérieures où il commence à trouver un écho, en particulier autour des théories néolibérales des années 1920 (par le biais de plusieurs courants, "austro-américain" et "ordolibéral allemand", notamment). Nous renvoyons par exemple aux *Habits neufs de la politique mondiale. Néolibéralisme et néo-conservatisme* de Wendy Brown (Brown, 2007).

A ce propos, soulignons que R. Scorer traite les économistes de son temps principalement comme de simples continuateurs d'un paradigme économique déjà puissant au XIX^{ème} siècle – à l'exception près, certes décisive, que les économistes de son temps auraient un pouvoir politique beaucoup plus grand que leurs aînés, et avec une emprise

Par ailleurs, nous ne nous lancerons pas, ni ici ni ailleurs, dans une discussion relative aux débats sur le « principe de précaution » – dont Scorer offre une très mauvaise entrée en matière !

Faire entrer les sciences en démocratie

Comme nous venons d'en donner de premiers exemples, la pensée politique de R. Scorer est imprégnée de références aux sciences des pollutions de l'atmosphère, mais également aux sciences humaines et sociales. Ceci concourt à le faire cheminer vers une théorie des Limites de l'environnement et des ressources, qui prévaut par ailleurs à la même époque dans certains cercles d'écologues (ainsi, par exemple, chez les auteurs de Ward & Dubos (Dir.), 1972). Après avoir exposé les critiques de la croissance, de l'enthousiasme tout "fiduciaire" pour certaines "technologies miracles", ou encore du principe de précaution qui nous détournerait de la bonne action politique, nous allons à présent nous focaliser sur les analyses que le météorologiste propose au sujet de l'utilisation des savoirs des sciences de la nature ; et, en particulier, de la partie des sciences de l'atmosphère qui se présente désormais comme une "science pour l'environnement", et souvent comme *science d'expertise environnementale*. Quelle est l'extension d'une telle science (*i.e.* ses budgets / son utilité) ? Quel rôle les hommes politiques comptent-ils lui faire jouer ? A nos yeux, ces analyses, qui sont exposées longuement dans le « Chapitre 2. La religion de la science » et le « Chapitre 3. Succès technologique » de *the Clever Moron* [Scorer, 1977 (1)], sont les plus perspicaces et les plus originales réalisées par Scorer, et également celles qui sont les plus pertinentes à commenter dans le cadre de notre projet.

---

plus grande sur les économies des pays étrangers (nous mettons là de côté la question des colonies, dont les économies avaient été évidemment largement asservies aux métropoles). Il écrit par exemple :

> "Actually what we are led to is a more advanced form of socialism. Capitalist (i.e. old-fashioned) *laissez-faire* was to some extent tolerable as long as its field of operation was only a small fraction of the world. In Britain in 1840 it was already producing conflicts in the control of land as enterprising people started to build railways and interfered with farms and estates. Today, *laissez-faire* only exists for the very powerful few". [Scorer, 1977 (1), p. 55]

Scorer ne semble pas avoir lu les économistes de son temps, et néglige par conséquent les mutations de son temps dans le champ économique, notamment les premières manifestations du tournant néolibéral – que, en 2009, Pierre Dardot et Christian Laval caractériseront par des gouvernements nationaux se « mu[ant] en un gouvernement de type entrepreneurial », en même temps que l'individu serait appelé désormais à se concevoir lui-même comme une entreprise, par l'épanouissement d'un capitalisme financier international (régulièrement « sauvé par l'*Etat néolibéral* »), par « la mise en place juridique et politique d'un ordre mondial de marché dont la logique implique non pas l'abolition, mais la transformation des modes d'action et des institutions publiques dans tous les pays » [Dardot & Laval, 2009, pp. 11-14]…

Nous n'avons ni les éléments bibliographiques des économistes des années 1970, ni les compétences, pour juger de l'actualité de la critique que Scorer fait de l'économie de son époque. Nous pouvons cependant faire remarquer que l'analyse macro-économique, très qualitative, de Scorer n'est pas sans rappeler des écrits contemporains d'Ivan Illich, ou des écrits de la fin du XIX^{ème} siècle, par exemple ceux de Pierre Kropotkine, qui appellent à la relocalisation des activités industrielles, montre les méfaits de la sur-spécialisation du travail, fait l'éloge de l'entraide, des petites communautés, *etc.* Ceci ne signifie *pas*, soulignons-nous, que la description macro-économique de Scorer ne fût plus "partiellement" d'actualité dans les années 1970, ni même aujourd'hui (par contre, il est fort probable qu'elle apparaîtrait très lacunaire aux yeux d'un historien de l'économie).

Dans *the Clever Moron*, Richard Scorer écrit que son projet consiste à donner des pistes sur « comment utiliser la science et comment être un scientifique, dans un monde dans lequel la quantité d'informations croît de manière exponentielle, en même temps que le nombre de gens impliqués » [Scorer, 1977 (1), p. 45]. Il s'agit pour Scorer de chercher la bonne place du scientifique de l'atmosphère, à l'heure d'une mutation profonde des sciences de l'atmosphère, qui vont partiellement s'intégrer dans des sciences de l'environnement dont l'expertise pour des politiques dites de conservation / préservation de l'environnement ou de gestion des risques environnementaux représente la finalité première… Une entreprise en partie autoréflexive pour Scorer, puisque, dans les années 1970, il participe lui-même à des expertises nationales sur les pollutions de l'air, au sein du 'Clean Air Council' du Royaume-Uni.

Les sciences nouvelles des années 1970

Au cours des deux dernières décennies, plusieurs historiens des sciences ont identifié les décennies 1960-70 comme le lieu d'une mutation générale de valeurs au sein de la communauté scientifique. Les années 1970 sont désignées par certains auteurs comme une période de mutation d'un « Mode 1 » vers un « Mode 2 » de production des connaissances (travaux de Gibbons, Novotny et collègues ; voir par exemple Gibbons *et al.*, 2004), ou d'un « régime de production des savoirs » à un autre, où des intrications particulières sont accentuées : entre sciences de la nature et sciences humaines et sociales (et pouvoir politique), entre questions locales et globales, *etc.* (voir Pestre, 2003). En particulier, les « sciences environnementales » émergent comme domaine « de plus grand intérêt pour les Etats et la sphère publique en général ». Dans le Tableau 2 ci-dessous, reproduit dans un rapport intitulé "Historical Perspectives on Science, Society and the Political" (2007) à l'attention du 'Science, Economy and Society Directorate' de la Commission européenne, rédigé par Dominique Pestre, Daniel Alexandrov propose une périodisation des modes de « sociabilisation » des scientifiques et de « production » des sciences depuis le XVIII^{ème} siècle. D'après lui, les « sciences environnementales » seraient devenues le domaine scientifique suscitant le plus d'intérêt dans les sphères « publique » et « d'Etat » dans le dernier tiers du XX^{ème} siècle (voir Tableau 2 ci-dessous).

	XVIII – early XIX cc.	XIX-XX cc.	late XX-XXI c.
Area dominating public/state interests	Cameral sciences	Laboratory sciences	Environmental sciences
Knowledge	Territorial	Disciplinary / Universal	Local knowledge / Glocal perspective
Dominant mode of coordination	Networks (patronage, peer)	Hierarchical organizations	Networks – multiple
Answerability	Political	Relatively autonomous	Broad Social / Political
Relations between science, government and industry	Boundaries not yet constructed	Emergence and maintenance of firm symbolic boundaries	Blurred boundaries
Scientists' employment	All sectors – flexible	Academic	All sectors – flexible
Relations between sciences	Syncretism of natural and social sciences	Natural and social sciences divorced, maintenance of disciplinary boundaries	Synthesis of natural and social sciences, blurred boundaries

Tableau 2 : Trois modes de « sociabilisation » des scientifiques et de « production » des sciences depuis le XVIII[ème] siècle

[Daniel Alexandrov **in** Pestre, 2007 (1), p. 55]

Le Tableau 2 indique en outre qu'un des attributs discriminants des sciences post-1970 est l'interdisciplinarité, en particulier « le brouillage des frontières entre sciences de la nature et sciences sociales ». Or, si Scorer déplore le manque de curiosité de ses pairs scientifiques pour les théories de sciences humaines et sociales de son temps, et s'il emprunte sa théorie des Limites, non aux scientifiques de l'atmosphère, mais à l'écologie, tradition née d'un brouillage des frontières entre sciences de la nature et sciences sociales, il n'aborde par contre jamais la question de l'interdisciplinarité. Dans les années 1970, selon lui, les communautés disciplinaires (chimistes, météorologistes, économistes, *etc.*) demeurent les entités premières qui structurent les débats.

« Trop de science ! »

Second point. Si Scorer reprend à son compte le constat général de détérioration de l'environnement fait par des écologues, il s'éloigne par contre de nombreux écologues de son temps, et avec la majorité des scientifiques qui repensent alors l'environnement, au sujet du rôle à donner aux sciences dans la gestion de ce dernier. Prenons pour exemple le rapport officieux de l'UNCHE 1972, *Only One Earth*, publié en marge de la Conférence des Nations Unies sur l'Environnement Humain (UNCHE, Stockholm, 1972), et dirigé par l'économiste Barbara Ward et le microbiologiste René Dubos. Nous qualifierons ce livre d'ouvrage "d'écologie à ambition holiste", tant pour le projet du livre de faire un bilan des détériorations de l'environnement dans le monde, que pour les origines nationales diverses des collaborateurs, ainsi que pour les multiples origines disciplinaires de ces derniers.[332]

[332] Le projet avait en effet réuni des biologistes et des écologues (principalement), ainsi que des économistes, des sociologues, des anthropologues, ou encore quelque membres d'un « département d'économie et de développement

Après avoir rappelé que « certains savants [avaient] préconis[é] une extrême prudence dans le développement massif des transports supersoniques », les auteurs y déclarent :

> « Mais quoi qu'il en soit, il existe deux propositions sur lesquelles tous les savants seront d'accord. Les industriels, en utilisant l'air comme un gigantesque égout, peuvent exercer une influence profonde et imprévisible sur le climat de la terre, influence dont les conséquences ne concernent pas seulement les organismes qui s'occupent de la pollution mais la biosphère dans son ensemble. Et de là découle le second point. Nous avons absolument besoin de disposer de plus de connaissances, d'une simulation plus élaborée des effets climatiques par des ordinateurs géants », *etc.* [Ward & Dubos (Dir.), 1972, pp. 269-270]

Voici qui ne fait pas bon ménage avec l'aversion de Scorer pour les modèles numériques, dont il dénonce le pouvoir, aussi bien chez les économistes que dans la science des pollutions atmosphériques.[333]

Or, cette hostilité à l'égard des modèles numériques ne porte pas exclusivement sur la pratique de la modélisation en elle-même (que, certes, Scorer critique) ; elle se veut aussi une résistance contre *la technologisation* des politiques, qui entendent tirer leur légitimité d'une expertise scientifique qui prétend pouvoir donner des lignes directrices pour une action durable dans le temps. Nous touchons du doigt la divergence entre Scorer et les écologues *d'Only One Earth*. Certes, Scorer pourrait reprendre à son compte le constat alarmiste sur la contamination de l'environnement par les pollutions anthropiques (même s'il n'incriminerait pas seulement les « industriels » mais aussi et d'abord nos modes de vie et l'accroissement démographique incontrôlé). Et, comme Ward & Dubos (Dir.), 1972, Scorer présente sa pensée comme une réponse au problème des Limites globales, comme une alternative aux politiques menées, qui sont ignorantes des contradictions entre environnement global fini (monde plein), et démographie forte et croissance économique voulue infinie. *En revanche*, *Scorer n'appelle nullement à faire exploser le nombre de publications scientifiques sur les effets de l'homme sur l'environnement*, et surtout pas en générant des connaissances à l'aide d'ordinateurs géants. En clôture de sa préface à *The Clever Moron*, écrite en 1976, le 'Professor' à l'Imperial College de Londres déclare :

> « Je ne pense certainement pas que nous nous rendrions service en essayant d'être plus scientifique ('I certainly don't believe that we shall be helped by trying to be more scientific')), en particulier si cela signifie utiliser des ordinateurs, car voilà bien

agricole » ou « de la Banque centrale du Vénézuela », un « président du Comité des Nations Unies pour la planification du développement », *etc.* [Ward & Dubos, 1974 (1972), pp. 419-432]

[333] Précisons par ailleurs qu'il ne faudrait pas caricaturer *Only One Earth*. Ses auteurs reconnaissent qu'obéir à l'injonction à "plus de sciences de l'environnement" est moins important, par exemple, qu'obéir à l'injonction à la "décentralisation" des activités humaines – voir notre Conclusion à la partie B.

> les parfaits crétins ('morons'). En fait, nous n'avons pas besoin d'améliorer notre science ; elle est très bonne, et nous sommes très intelligents ('clever') ; mais nous avons été plutôt crétins ('quite moronic') dans notre confiance dans la science pour faire un travail pour lequel elle n'a jamais été appropriée. »[334] [Scorer, 1977 (1), p. xii]

Assez de science, trop de science ! La censure s'adresse aux économistes et leurs modèles défectueux ; elle s'applique également aux sciences de la nature, et en particulier aux sciences de l'atmosphère, le champ universitaire d'appartenance de Scorer. « Utiliser la science et […] être un scientifique, dans un monde dans lequel la quantité d'informations croît de manière exponentielle, en même temps que le nombre de gens impliqués », nécessite de la méthode, de la retenue, de la modestie face à la puissance prédictive des sciences, répète Scorer [Scorer, 1977 (1), p. 45]. Dans *The clever moron* (1977), contrairement aux écrits et allocutions de 1975, Scorer ne cherche pas tant à distiller des conseils et des mises en gardes à ses pairs sur "comment faire de la bonne science non ingénue à l'heure où les données affluent en grande quantité", qu'à mettre en garde contre la tentation de l'omnipotence scientifique procurée en partie par les nouvelles 'Big technologies' (satellites, ordinateurs puissants, moyens de communication rapides) et par la place croissante donnée aux sciences dans la décision politique.

En outre, cette *sobriété scientifique*, qu'il appelle de ses vœux, demande dans son esprit un effort de même nature que celui pour la sobriété qu'il préconise dans les nouveaux modes

---

[334] *The Clever Moron* peut être compris comme une suite de variations sur le thème "nous, les hommes, sommes de très intelligents ('clever') crétins ('morons')". Cet oxymore prend tout son sens lorsqu'appliqué à notre déni des Limites vers lesquelles nous conduirait la croissance, et à l'absence de projet politique derrière la sainte injonction à innover et produire plus d'activités rémunératrices. En faisant usage d'une naturalisation (très contestable) du développement technologique (Scorer écrit : "Policies have been devised to make the most of the opportunities opened up by technology and have not themselves created the opportunities"), L'auteur anglais explique :

> "If I had called this book *The Clever Glutton* it would have missed the point that we have been at the same time very clever and extremely unperceptive. The gluttony is incidental. […]
>
> "Being clever means having theories about what we are as individuals, as families and as a race, about what our earth is, and what its place is in the universe. We also have theories about how the world works, and about how societies, money, trade and industries work, and we have very clever ways of developing and applying these theories.
>
> "[… *However,*] our fate is determined more by the physical make-up of the world we live in than by our policies. Policies have been devised to make the most of the opportunities opened up by technology and have not themselves created the opportunities. The great economic growth of Industrial Revolution Man was due to his stumbling upon coal, oil and different kinds of engine. Coal, oil and the engines were not created by capitalism, Marxism or any theory about human organisation nor even by the practice of economics and politics will create substitutes for everything that gets used up is the product of the wishful moron in us.
>
> "[… I]n reality [our Industrial Revolution has been] stealing [our wealth] from posterity. […] The self-deception has taken many sinister forms. [But w]hile we preached gluttony at every turn we said we weren't gluttons. […Now t]he accounting is about to begin. Man has been prodigal because he has been clever, but his indulgence has made him a moron. […]

La conclusion finale emprunte quant à elle ses accents à la philosophie pratique (dont la philosophie morale et la philosophie politique) :

> "Skill of hand and brain together in one body, in one person, is the height of living. It is a moronic cleverness to have skill only in the intellect. The issue is not human rights or human needs but what sort of people we want to be. That always was the issue until wealth made morons of us." [Scorer, 1977 (1), pp. x, 1, 4-5 & 166]

de vie humains qu'il souhaiterait voir se généraliser à l'heure où « la gloutonnerie » de l'homme l'a poussé vers une raréfaction des ressources naturelles et des désordres sociaux. Il écrit :

> « **Nous ne devons pas supposer que les données sont utiles**
>
> « Ainsi, nous avons besoin d'être plus pauvres, de prêter plus d'attention à nos modes de vie, plutôt qu'exploiter le potentiel des richesses du monde. [...] Ceci a l'apparence d'un sermon, mais il ne s'agit pourtant pas de quelque injonction à l'ancienne, de pratiquer l'abstinence comme un exercice moral, même si je suis consciemment tenté de faire cela. Nous devenons intellectuellement obèses, incapables désormais de distinguer ce qui a bon goût de ce qui est médiocre. Nous inondons le monde de données : l'élaboration de banques de données et le traitement de données sont des secteurs lucratifs ('data-banking and data-processing are big business'), et beaucoup de données sont mauvaises, peu fiables ('unreliable'), mal acquises (ill-gotten'), voire même largement fausses. Quelques manipulateurs de données ambitieux passent leur vie à cataloguer et produire des données environnementales collectées par des systèmes de surveillance [qui sont rendues] disponibles à des scientifiques travaillant en science environnementale ('working in environmental science'). La plupart des données ne sont pas utiles et ne le seront jamais ; la possession de savoir superflu donne un pouvoir illusoire et nuit en fait au pouvoir véritable. [...]
>
> « Si [une] analyse chimique [des eaux de pluie] peut être erronée mais crue [pendant des années (dix-sept ans, pour l'exemple pris par Scorer des eaux de pluie recueillies dans le nord-ouest de l'Europe)], sommes-nous sages de croire une masse d'autres statistiques qui sont collectées et utilisées comme bases à des théories et à des décisions [politiques] ? [...]
>
> « Toutes ces critiques sont plus ou moins une mise en examen ('an indictment') de l'attitude de l'homme de science ('scientific man'). Nous devons apprendre, non seulement l'art de vivre avec moins de richesse matérielle, mais également avec moins de savoir que ne le pense nécessaire le scientifique pour prendre des décisions politiques, et apprendre à avoir du discernement au sujet des prétendus faits et à tirer moins vite des conclusions. »

Avant d'ajouter, quelques lignes plus loin : « Comme nous l'avons signalé dans le chapitre 4, la plupart des religions et morales anciennes étaient des tentatives de systématisation de la prise de décision [politique] »… Quoiqu'il en soit, déclare-t-il, « une manière saine de penser ne dépend pas de la possession d'une grande quantité de données »… A la "'sound science'

qui tend prétendument vers l'exhaustivité", et aux controverses sans fin sur les résultats des modélisations numériques, il faut opposer, dit-il

> « un solide pouvoir de jugement ('a sound power of judgment'), afin que nous sortions de notre dépendance à l'information spécialisée ('get out of our dependence on specialist information'). » [Scorer, 1977 (1), pp. 150-152]

Une entreprise destinée à freiner l'accumulation de données, c'est-à-dire la quête d'objectivité, est très originale pour un scientifique, qui plus est chez un météorologiste. C'est aller à rebours de la tradition dominante de cette science depuis le XIX^{ème} siècle.

Ni technocrate long-termiste (le cybernéticien), ni technocrate court-termiste

La remise en question des sciences qu'effectue Scorer ne s'arrête pas à cette entrave au "progrès par accumulation des données". Le Britannique formule une critique générale de notre rapport politique aux sciences, et en particulier à l'expertise sur l'environnement (dont l'ozone), sur laquelle il revient à de multiples reprises dans *The clever moron*. Scorer souhaite opérer *un double renversement concernant les pratiques de production et de diffusion des savoirs scientifiques*, et leur "*utilisation*" *politique* :

- *un renversement dans l'attitude de ses pairs scientifiques, qui collaborent en tant qu'experts à des politiques inefficaces* – « les scientifiques font partie d'une machine que tout le monde aide à faire avancer mais que personne ne dirige », écrit-il ;
- *un renversement dans la manière dont le citoyen et le décisionnaire politique regardent la science, et par conséquent lui accordent du crédit* – « la pensée est esclave de ce qu'on pense être la science » [Scorer, 1977 (1), pp. vi-vii].

Ainsi, en définitive, il apparaît que ce n'est pas tant pour contester la possibilité d'une destruction anthropique de l'ozone que le météorologiste a contesté avec virulence l'autorité des chimistes lanceurs d'alerte, que pour déplacer le regard de son lecteur vers une réflexion politique, qui passe notamment par une réévaluation de l'utilisation et de la nature-même de l'expertise scientifique. Scorer adopte à plusieurs reprises une rhétorique de hiérarchisation des problèmes politiques. Dans son article de 1975 dans *New Scientist*, il écrit :

> « La manière compartimentée de penser prévient toute comparaison entre l'augmentation hypothétique de cancers de la peau qui serait provoquée par une diminution d'ozone, et la misère énormément plus importante produite quotidiennement par les effets sur la santé des cigarettes, du chômage, et de l'utilisation des armes modernes. » [Scorer, 1975, p. 703]

Ce type de raisonnement ne manque pas de laisser le lecteur perplexe.[335] D'autant plus que insister sur la hiérarchisation des problèmes n'est pas une méthode adroite pour en dénoncer la « *compartimentation* »... or, tel est pourtant l'objectif de Scorer.

Selon lui, *les problèmes sanitaires, environnementaux,* etc. ne sont, en effet, pas contingents, mais *structurels*. La compartimentation des problèmes est intrinsèque à une modalité d'action politique, technocratique et libérale, avec laquelle Scorer souhaite nous voir rompre. Les problèmes de pollution devraient être traités comme des problèmes politiques macrostructurels. Leur résolution demanderait du temps et appellerait des changements politiques profonds. « Il est plus facile de souscrire à un principe négatif [(Scorer parle ici du principe de précaution)] qui ne dérange pas nos vies personnelles, plutôt que de faire l'effort nécessaire pour encourager une réforme positive ('to make the effort required to support positive reform'), avait-il écrit dans *New Scientist* [Scorer, 1975, p. 702]. Puis, quelques mois plus tard, lors de son échange avec les chercheurs du NCAR au cours de l'été 1975, il avait déclaré : « Il nous faut réaliser les changements lentement […]. Cela ne vaut pas le coup de commencer avec les bombes aérosols. Nous devrions commencer avec quelque chose comme les voitures ('We should begin with something like cars') ». David Atlas lui avait alors rétorqué : « Comment es-tu monté au sommet de la colline, Richard ? » A quoi Scorer avait répondu : « le NCAR, malheureusement, a été construit suivant l'hypothèse que tout le monde eût une voiture. » [Scorer, 1975 in *NCAR*, 1975, p. 5]

L'opposition du météorologiste anglais à cette vision technocratique, technicienne du politique, est peut-être ce qui fait sa plus grande originalité au sein de la communauté scientifique des années 1970. Scorer juge que ses collègues scientifiques se fourvoient. Ils répondent tous, plus ou moins, d'une manière ou d'une autre, aux sirènes de la technocratie. Nous avons identifié trois catégories de scientifiques décriés par Scorer, qui obéissent à trois visions archétypiques des sciences et de la politique.

Les premiers sont les "enfants de la Guerre froide". Parmi eux, on trouve James Lovelock, un ancien de la NASA et un fils de la cybernétique (*cf.* Lovelock, 2000 (1979), « Chapter 4. Cybernetics »). L'historien des sciences Sebastian Grevsmühl reconnaîtra même en Lovelock (peut-être quelque peu abusivement) un « acteur idéal-typique de la Guerre froide », tant dans ses pratiques scientifiques instrumentales que dans sa vision politique technocratique. Une vision qui le conduit, de fait, aujourd'hui, dans le

[335] On retrouvera dans les années 2000 cette rhétorique de la hiérarchisation des problèmes, notamment autour du changement climatique. Par exemple, le "climatosceptique" le plus célèbre de France, le géologue et ex-ministre Claude Allègre, n'aura de cesse de répéter qu'il faudrait s'attaquer *d'abord* à des problèmes plus urgents que le changement climatique (par exemple, les inégalités sociales, ou les problèmes climatiques qui sont déjà là), avant de nous soucier de ce dernier.

catastrophisme ambiant relatif au changement climatique, « à demander la suppression de la politique au nom de la science et de l'environnement », comme le formule S. Grevsmühl [Grevsmühl, 2012, p. 374]. Le 29 mars 2009, *The Guardian* rapportait les propos suivants, qu'avait tenus James Lovelock à l'un de ses journalistes :

> « L'une des principales obstructions à une action significative est la « démocratie moderne » [...] Même les meilleures démocraties sont d'accord pour dire que, quand une guerre importante approche, la démocratie doit être provisoirement mise en suspens. J'ai le sentiment que le CC pourrait être un problème aussi grave que la guerre. Il se pourrait qu'il soit nécessaire ('It may be necessary') de mettre la démocratie en suspens pour quelque temps ('to put democracy on hold for a while'). » [Lovelock, 2009 (2)]

En tout cas, J. Lovelock n'a jamais dénoncé la tendance à une *technologisation* croissante des problèmes de société, dont les problèmes environnementaux, à grand renfort d'expertises scientifiques et de données. Il n'a eu de cesse, au contraire, de les encourager.

R. Scorer nage donc à contre-courant de Lovelock ou de beaucoup d'autres chercheurs "issus" du monde de la recherche de la Seconde Guerre mondiale et de la Guerre froide. Bien que le météorologiste britannique, né en 1919, ait réalisé l'essentiel de sa carrière de scientifique à l'heure où la majorité des financements étaient belligérants – et, il a indiscutablement bénéficié indirectement de ceux-ci (il a même analysé de très précoces photographies satellitaires en compagnie de H. Wexler –[336], il cherche à *remobiliser le politique, à raviver les forces*, contre la technologisation et la "scientifisation" de la politique. Aussi, lorsqu'il se lance dans des constats sur les contradictions de l'économie croissantiste mondialisée, ce n'est pas pour encourager une gestion plus élitiste, plus technocratique et plus scientiste de la planète. Mais tout l'inverse.

De fait, dans le cœur des scientifiques sommeillent parfois de redoutables technocrates. Ils peuvent, tel Lovelock, échafauder *in abstracto* des utopies scientistes et technophiles, qui ne sont autres que de grandes architectures technocratiques à l'attention de… de qui donc ?, d'un despote éclairé à venir ?... Et, à l'image de Lovelock, ils peuvent rencontrer un écho éditorial important, en partie grâce à leurs galons de scientifiques-découvreurs / pionniers (Il est, à l'inverse, très difficile de se procurer les écrits politiques de Scorer, dont son rapport de 1972 et son long pamphlet *the Clever Moron*).

Plus encore que Lovelock, le parfait antagoniste de Scorer parmi les enfants de la Guerre froide serait le "futuriste" états-unien Richard Buckminster Fuller, auquel

[336] Les travaux de Scorer sur les images satellitaires de nuages furent même dans un premier temps le fruit d'une coopération avec Harry Wexler. Ils cosignèrent un ouvrage intitulé *A colour guide to clouds*, publié en 1963 chez Pergamon Press (à titre posthume du côté de Wexler, donc, mort en 1962).

S. Grevsmühl a consacré de longues pages (*Cf.* Grevsmühl, 2012, pp. 351-374). L'enthousiasme presque enfantin de Richard B. Fuller au sujet des possibilités de maîtrise, technologique et technocrate, de l'abondance et de la durabilité/renouvellement des ressources, contraste avec "l'optimisme imparfait" de Lovelock sur les capacités de régulation de Gaia dans les années 1970-80 (qui se muera ensuite en pessimisme dans ses ouvrages post-1990). Pour Fuller, le père de la métaphore du « vaisseau spatial Terre » ('Spaceship Earth' ; 1951), il n'existe guère de potentialités de déclin dans l'intense et mondiale croissance industrielle et économique, porteuse de capacités de contrôle technologique semble-t-il immense. Il reste simplement à achever la soumission de la politique à une science du progrès perpétuel ! Aux yeux de ce "scientiste façon Guerre froide"[337], « l'éthique de la pénurie ('scarcity ethics') » promulguée par les avocats de la doctrine « malthusienne » telle qu'elle a été défendue par exemple par Paul Ehrlich dans *Population Bomb* (1968) est une absurdité. « Au caractère fini des ressources, rapporte Sebastian Grevsmühl, Fuller oppose la 'design science'. Cette sorte de super-science ingénierique globale, destinée à tracter les sciences et les techniques et à guider les décideurs politiques, « permet[trait] de mettre en place une « éthique ou une économie d'abondance » par anticipation ». Fuller écrivit : « la 'design science' […] peut à elle seule résoudre le problème » de la pénurie à l'échelle globale. Il faudra simplement organiser des séries de « sommets mondiaux » (puis publier des « traités informatisés »), dont les discussions seront informées par une science de gestion du vaisseau Terre modélisée par informatique,

[337] Dans un célèbre article daté de 1911 paru dans *la Grande Revue*, le biologiste Félix le Dantec fait, pour l'une des premières fois, usage du mot « scientisme ». Il le définit comme une croyance consistant à reporter sur la science les principaux attributs de la religion. Il écrit :

> « Je crois à l'avenir de la Science : je crois que la Science et la Science seule résoudra toutes les questions qui ont un sens ; je crois qu'elle pénétrera jusqu'aux arcanes de notre vie sentimentale et qu'elle m'expliquera même l'origine et la structure du mysticisme héréditaire anti-scientifique qui cohabite chez moi avec le scientisme le plus absolu. Mais je suis convaincu aussi que les hommes se posent bien des questions qui ne signifient rien. Ces questions, la Science montrera leur absurdité en n'y répondant pas, ce qui prouvera qu'elles ne comportent pas de réponse. » [Dantec, 1911 **in** Calame, 2011, p. 52]

On voit là poindre, dans la deuxième partie, la posture dite « néopositiviste » de l'empirisme logique. Il n'est pas certain que Scorer soit réfractaire à ce volet "clarification" des questions par la science. Sauf qu'il dirait probablement : "par *les sciences*, par une pluralité d'approches". En outre, cet homme des années 1970, qui se dresse contre la science outrecuidante de la Guerre froide, rejetterait totalement la première phrase de la citation de Dantec.

De multiples définitions générales du Scientisme ont été proposées. En voici une de l'ingénieur agronome et essayiste Matthieu Calame, qui convient parfaitement à l'idéologie de Fuller :

> « D'une manière plus générale, le scientisme est une philosophie qui considère que l'innovation technique est la seule voie de résolution des problèmes, y compris ceux créés par la technique elle-même, qui prétend que tout peut être géré scientifiquement, et qui dénonce tout contradicteur ou tout tenant de la primauté de la sphère politique sur la sphère technique d'être antiscientifique, obscurantiste… Sur la base de ce credo, le scientiste postule implicitement que la société doit se fonder avant tout voire exclusivement sur la science dans le sens qu'il lui donne. Ce qui rend les questions émotionnelles, esthétiques, et même politiques, secondaires. En clair, la technique est un nouveau nom de la destinée et une poignée d'hommes, des clercs modernes, en sont les gardiens et se font fort de guider l'humanité. Le scientisme est donc un cléricalisme ayant la technique pour dogme et la science comme alibi. » [Calame, 2011, pp. 52-53]

semblable à sa propre simulation informatique dite 'World Game' (ou 'World Peace Game', développée à partir de 1961). Cet autre fils de la cybernétique écrira que

> « [Les joueurs du] 'World Game' [auront pour vocation de] forcer graduellement les politiques mondiales à passer à des programmes mondiaux basés sur des modélisations numériques mutuellement bénéfiques. » [Fuller, 1971, *the World Game* & Fuller, 1969, 'Hearing before the US Subcommittee on Intergovernmental Relations of the Committee on Governement Operations' **in** Grevsmühl, 2012, pp. 360-361][338]

---

[338] La définition que donne Fuller de sa 'design science' laisse transparaître le caractère intrinsèquement totalitaire du programme néo-positiviste de l'Etats-unien :

> ""The function of what I call design science is to solve problems by introducing into the environment new artifacts, the availability of which will induce their spontaneous employment by humans and thus, coincidentally, cause humans to abandon their previous problem-producing behaviors and devices. For example, when humans have a vital need to cross the roaring rapids of a river, as a design scientist I would design them a bridge, causing them, I am sure, to abandon spontaneously and forever the risking of their lives by trying to swim to the other shore."
> - R. Buckminster Fuller, from *Cosmography*"

Les auteurs du site Internet du 'Buckminster Fuller Institute' ajoutent :

> "Design Science is a problem solving approach which entails a rigorous, systematic study of the deliberate ordering of the components in our Universe. Fuller believed that this study needs to be comprehensive in order to gain a global perspective when pursuing solutions to problems humanity is facing."
> [*Buckminster Fuller Institute's website*, 2013, http://bfi.org/design-science (15/03/2013)]

Selon ses dires, Richard Buckminster Fuller aurait employé la métaphore du « vaisseau spatial Terre » pour la première fois en 1951, au cours d'interventions au MIT, au Blackmountain College, à Harvard et dans d'autres rencontres universitaires. Mais c'est seulement à partir de 1964 « que Fuller commence à donner des conférences explicitement sur ce thème. Son texte intitulé « Spaceship Earth » est devenu par la suite l'une des interventions les plus connues de son œuvre. Il s'agit là d'un discours que Fuller prononça devant des publics plus larges, non sans apporter à chaque fois des modifications au texte initial. L'évolution de sa réflexion aboutira, en 1969, à son livre *Operating Manual for Spaceship Earth* ».

La « confiance » de R.B. Fuller « dans le fort potentiel des ingénieurs et de la techno-science » est telle, écrit l'historien des sciences Sebastian Grevsmühl, qu'il nie tout bonnement la possibilité d'une contradiction dans sa théorie de gestion scientiste (et technocratique) des crises environnementales et sociales globales "par le développement de l'abondance". « Dans l'univers de Fuller, l'ingénieur-architecte est *le mieux* placé pour résoudre toutes sortes de problèmes à l'échelle globale, comme les pénuries de ressources naturelles et la croissance de la population. […] Face au caractère fini des ressources, commente Sebastian Grevsmühl, [Fuller propose une] « science de design » qui permet de mettre en place une « éthique ou une économie d'abondance » par anticipation […] Fuller est profondément convaincu que seule la rationalité personnifiée par l'élite managériale et scientifique peut résoudre les grands problèmes sociétaux et environnementaux. »

Nous voici donc conduits vers ce que Sebastian Grevsmühl a appelé « un monde sans politique ». « La gestion des ressources s'inscrit chez Fuller dans un projet politique très particulier, écrit l'historien, car à long terme, elle est destinée à se *substituer* à la politique. […] Dans une expérience de pensée presque provocatrice, qui se trouve en annexe du témoignage de Buckminster Fuller devant le Sénat [états-unien, le futuriste] soutient que, tandis que la suppression de l'infrastructure industrielle et de communication entrainerait la mort de la moitié de la population mondiale en deux semaines seulement, l'envoi (certes, hypothétique) de l'ensemble de la classe politique et militaire dans un voyage perpétuel autour du soleil n'aurait que des conséquences positives : débarrassé des frontières et des idéologies nationales sur lesquelles veillent les politiciens et militaires, « l'Homme commencerait à distribuer plus de produits et de nourriture librement à travers les frontières » (Fuller, 1969). On voit bien que dans la vision fullerienne de l'avenir du monde, juge Sebastian Grevsmühl, les politiciens seraient forcée tôt ou tard de passer le volant du vaisseau spatial Terre à une élite de designers et de technocrates », de « visionneurs » (mot valise : « visionneurs » = « vision » + « ingénieurs » ; McCray, 2012). Dès la fin des années 1960, ces « visionneurs » se verront opposés « des critiques sévères qui voient dans la conception même de ces projets un "fundamental totalitarian impulse", ou bien le début d'une technocratie lourdement anthropocentrique. Dans une lettre adressée au "Whole Earth Catalog" (la « bible » de la contre-culture, elle-même le produit des photographies spatiales et de la techno-philosophie de Buckminster Fuller), un écologue se demande de façon très pertinente « si nous [ne] sommes [pas] en train de

Voici ce qu'aurait pu répondre Scorer à Fuller, s'ils avaient conversé :

> « Nous ne pouvons jamais avoir pleine conscience d'un système cybernétique qui nous contient [... N]ous n'avons aucun moyen de savoir quelle est la part essentielle du système. »

Avant d'ajouter :

> « Nous nous formons ('we nurture one another') à travers l'organisation de notre société [..., tant et si bien qu'] il n'est pas facile de voir comment notre propre comportement donne à notre propre société une force qui nous est à tous bénéfique, indépendamment de toute compétition avec d'autres groupes humains. » [Scorer, 1977 (1), pp. 94-95]

La seconde "catégorie" de scientifiques regroupe les "naïfs", qui pensent que réglementer les crises environnementales au cas par cas, au fil de leurs apparitions, serait la meilleure chose à faire, et suffirait.

Dans la troisième "catégorie", enfin, on trouve des "opportunistes", qui utilisent les médias et les membres des agences spécialisées dans l'environnement pour obtenir des financements. Soulignons que ces deux "catégories" de scientifiques se superposent en partie, et nous pouvons ici les traiter ensemble, car elles entretiennent aux yeux de Scorer le même rapport à l'expertise et au politique. Un rapport technocratique, et surtout *court-termiste*, car compartimentée et mû par l'agitation médiatico-politique qui sonne comme une injonction à l'action, n'importe quelle action.

Les experts sous l'autorité de la NAS entre 1974 et 1976 furent régulièrement en interaction avec des membres de l'EPA, et la réglementation à venir des CFC ne faisait guère de doute. Au retour d'une conférence de trois jours tenue à Logan (Utah) en septembre 1976, Scorer disait avoir « eu l'impression que les réglementateurs avaient [déjà] pris leur décision bien avant » que les conclusions du Rapport du comité sur les impacts des changements stratosphériques, dirigé par la NAS, ne leur fussent exposées (fin 1975). Au cours de la conférence, ils avaient présenté leurs opinions, sans avoir pris soin « d'apprendre un peu plus au sujet des réalités physiques » : leurs opinions n'avaient nullement été « modifiées par les discussions scientifiques qui avaient précédé leurs interventions (interventions qui [étaient] venues à la fin de la Conférence de Logan) ». [Scorer, 1977 (2), pp. 656-657].

Premier point : les scientifiques qui contribuent à des expertises dans l'optique d'une réglementation politique "annoncée", en particulier, *le font en interaction ténue avec le pouvoir*

---

devenir des technocrates de la Terre entière, assurant uniquement notre propre survie ». » [Grevsmühl, 2012, pp. 351 & 360-363]

décisionnaire. Certes, mais, pourrait-on objecter à Scorer, cette manière technocratique de gouverner est seulement "modérément" technocratique, puisque impliquant des élus.

Autre vertu : elle n'a pas seulement pour vertu d'accélérer le processus d'action politique (ce qui est parfois nécessaire, du reste), mais tout simplement, souvent, de l'enclencher. Le revers de la médaille, et c'est le second point de Scorer, réside dans le fait que cette accélération du processus peut prendre la forme d'une *urgence, où les temporalités "politiques"* (temps limité de toute mobilisation collective, prochaines échéances électorales, recherche à tout prix de résultats de la part d'une agence environnementale telle que l'EPA en quête de légitimité, *etc.*) *peuvent prendre le pas sur les temporalités "scientifiques"*. Scorer n'aura de cesse de répéter que de longues années seraient nécessaires pour élaborer une science de la destruction anthropique de l'ozone digne de ce nom. Or, écrira-t-il, « la quantité de surveillance ('the amount of monitoring') nécessaire pour améliorer significativement les méthodes de prédiction des effets de la pollution [sur l'ozone stratosphérique] est telle que qu'il y a peu de chance qu'elle soit entreprise sur plusieurs décennies »… On retombe sur la question du choix des priorités d'allocation des budgets publics : « au cours des 50 prochaines années, écrit cet "Internationaliste", […] l'humanité va devoir faire face à des famines et autres calamités aux proportions désastreuses, et quelques cas de mélanomes évitables [(évitables grâce à « un spray à base de CFM, protecteur de la peau [(éventuellement sensible aux UV-B)] », par exemple, propose Scorer !)] n'apparaîtront pas sur la liste des priorités. » [Scorer, 1977 (3), p. 277 ; Scorer, 1977 (2), p. 657]

« Les pouvoirs publics financent la recherche comme si elle était un exercice d'ingénierie dont on pourrait attendre avec confiance qu'elle accomplisse un dessein »

En outre, la participation des scientifiques à des expertises directement destinées à prendre des décisions politiques rapides peut s'expliquer, non seulement comme un moyen de financement ou comme une forme d'action que les scientifiques pensent bénéfiques (tout le moins serait-ce mieux que rien), mais également comme le corollaire de *leur confiance excessive dans leurs savoirs et donc aussi dans les capacités humaines de maîtrise de l'environnement*. Parallèlement, cette outrecuidance ne les pousse pas à faire l'effort de *penser les problèmes environnementaux au sein d'une société complexe, donc très imparfaitement gérable par des sciences réductionnistes.* « Ce que les scientifiques refusent constamment d'accepter, déplore Scorer, c'est le besoin d'apprendre à vivre avec une complexité infinie et incontrôlable ('the need to learn to live with infinite and unmanageable complexity') » [Scorer, 1977 (1), p. 51].

Cette vision simpliste est portée par beaucoup de ses pairs, mais également par beaucoup d'économistes. Scorer critique plus volontiers la vision politique de ces derniers, car leur influence dans les prises de décision politique importantes semble plus patente aux

yeux de Scorer. Et, parallèlement, bien sûr, les techniciens de la politique qui les encouragent dans cette vision, car rêvent de trouver chez les scientifiques des modèles gestionnaires simples, qui éviteront des ruptures dans la marche en avant de l'idéologie en marche (l'économie de la croissance, les déséquilibres Nord/Sud, *etc.*). « Les pouvoirs publics financent la recherche comme si elle était un exercice d'ingénierie dont on pourrait attendre avec confiance qu'elle accomplisse un dessein. Pourtant, tout scientifique sait que son travail crée une nouvelle prise de conscience de son ignorance croissante, affirme Scorer, un brin provocateur ('The public sponsors research as if it were an engineering exercise confidently expected to achieve a design. Yet every scientist knows that his work creates new awareness of more ignorance.') » [Scorer, 1975, p. 702]. Scorer moquera notamment le « Dr. Wilson K. Talley, de l'EPA » qui, au cours de la conférence à Logan (Utah) en septembre 1976, où furent notamment exposées les dernières conclusions du rapport de la NAS sur l'ozone, « semblait chercher une solution simple à chaque problème environnemental, afin qu'aucune complication de jugement ne puisse advenir » ![339] [Scorer, 1977 (2), p. 655]

Scorer n'interdit pas au scientifique de lancer des alertes environnementales. Il ne rejette pas non plus toute forme de participation à des groupes d'expertise pour la gestion des risques environnementaux ; lui même a, au cours des années 1970, apporté sa contribution à plusieurs comités d'expertise sur les pollutions de l'air et de l'eau au Royaume-Uni (le 'Metropolitan Water Board' et le 'Clean Air Council'). Mais, il met en garde ses collègues sur les dangers possibles de telles pratiques, en particulier pour des questions globales, dont la mitigation implique selon lui nécessairement des mutations politiques, géopolitiques et culturelles profondes. Sous peine de se voir confisquer le politique *et* d'être inefficaces à répondre aux défis qu'ont lancé la Modernité et les Trente glorieuses.

Il existe en fait un risque double pour le scientifique de coopérer malgré lui à un programme politique inapte à mener aux résultats qu'il en attend. D'une part, la gouvernance qui s'appuiera sur cette expertise ne risque-t-elle pas de se limiter à un simple pis-aller, qui retardera des mutations autrement plus décisives pour la résolution des

[339] Le paragraphe va comme suit :

> "Dr. Wilson K. Talley, of the Environmental Protection Agency (EPA) seemed to be seeking a scientific solution to every environmental problem so that there could be no complications of judgment. But the environment does not present us with problems to solve in the conventional scientific manner: it presents us with an evolutionary scene in which human excess occasionally creates predicaments which have no analogy in engineering or laboratory practice and require the kind of judgment that business men, politicians, and good engineers are used to exercising, and which the NAS committee also displayed. The committee was criticised for even expressing an opinion about the need to legislate, but they could not keep away from this issue because of the present state of human ignorance, and the naive interpretations often put on what scientists say." [Scorer, 1977 (2), p. 655]

problèmes environnementaux – notamment, des mutations vers les alternatives à des trajectoires technologiques (par exemple, l'utilisation massive des combustibles fossiles) ou à des modes de production/consommation autrement plus néfastes pour l'environnement (et le sort des travailleurs, des habitants) ? D'autre part, la pratique d'expertise dominante ne repose-t-elle pas sur une vision fausse des sciences, que s'accordent à reconduire décisionnaires politiques et scientifiques-experts afin de faire perdurer leur pouvoir ? Ne trouve-t-on pas dans *The Clever Moron* un chapitre intitulé « la religion de la science », puis un intertitre « la science nous donne des tâches sans prendre les buts en considération », qui pointe clairement une "contradiction" entre élaboration des savoirs scientifiques et visées politiques ? Scorer entend mettre en garde au sujet des *incertitudes* inhérentes aux savoirs scientifiques, et contre les *prétendus consensus* scientifiques qu'utilisent les pouvoirs politiques, ainsi que contre *une culture politique en demande perpétuelle de consensus scientifiques* qui feraient autorité et légitimeraient leurs actions politiques (ce qui déresponsabiliserait dans le même temps les décisionnaires politiques). [Scorer, 1977 (1), pp. v-viii]

En fait, lorsque Richard Scorer s'exprime au sujet de l'expertise de l'ozone, y compris dans des conférences réservées aux scientifiques de l'atmosphère ou dans un journal de vulgarisation scientifique (*New Scientist*), il questionne surtout le gouvernement de l'environnement qu'il voit se mettre en place, qui tendrait à être *technocratique* et *technophile*. En corollaire, il met en garde les scientifiques – du secteur public, en particulier – contre la dérive politique dans laquelle ils se retrouvaient entrainés (peut-être sans s'en rendre compte, ou pour profiter de l'opportunité qui s'offrait à eux de participer à l'exercice du pouvoir à un haut niveau de décision politique, aux côtés des élites décisionnaires)[340]. On rapporte que, lors de sa conférence au NCAR, Scorer déclara que son « pessimisme prov[enait] du fait que tant de gens pens[aient] que l'utilisation de plus de technologie – pour contrôler le temps et le climat, par exemple – et de plus de ressources permettrait de supporter une population mondiale grandissante ». Puis, il aurait prononcé ces mots :

> « Il y a une tentative de contrôler et de prédire trop. En ce qui concerne les questions environnementales, nous essayons d'obtenir d'un gouvernement ou d'une agence qu'ils résolvent le problème – et ceci peut mener à une « tyrannie technologique » ('technological tyranny'). » [Scorer, 1975, p. 5]

[340] Les mots utilisés par l'éditeur de *the Clever Moron*, Routledge & Kegan Paul, sur la Première de couverture, annoncent de manière pour le moins tapageuse la dénonciation du manque de réflexivité que fait Scorer, au sujet des scientifiques qui délivrent les expertises, et des ingénieurs qui s'entêtent et sont reconduits dans certains développements technologiques particuliers :

> "[This book c]hallenges bureaucrats and mindless scientists who fail to allow in their plans for forces of evolution."
>
> "Bitterly criticises hasty technological advances which by their very success destroy the environment." [Scorer, 1977 (1), 1ère de couverture]

Quelques mois plus tôt, rappelons-le, Scorer avait écrit dans *New Scientist* :

> « Les pouvoirs publics financent la recherche comme si elle était un exercice d'ingénierie dont on pourrait attendre avec confiance qu'elle accomplisse un dessein. Or, tout scientifique sait que son travail crée une nouvelle prise de conscience de son ignorance croissante. » [Scorer, 1975, p. 702]

« La raison de sa tournée aux Etats-Unis [avait été] « de prêcher un peu de modestie » aux dirigeants technologistes, politiciens et religieux », aurait humblement conclu Scorer devant ses pairs du NCAR [*NCAR*, 1975, p. 5]! Il n'est pas acquis que cette dernière bravade plût à ces derniers, ni que Conway et Oreskes, la découvrant aujourd'hui, accorderaient au météorologiste le rachat de son âme.

Pour résumer, nous avons passé en revue différents aspects de la pensée de Scorer, qui font système : lutter contre le 'technological fix' ; décloisonner les domaines d'expertise pour penser un environnement complexe, trop complexe pour être géré et donc appelant à polluer de manière parcimonieuse ; s'émanciper de la pensée Guerre froide ; redouter la tyrannie technique des décideurs politiques nationaux et leurs experts « outrecuidants » (économistes ; scientifiques de l'atmosphère délivrant des expertises pour des agences spécialisées, parfois avec des outils de gestion "clef en main" comme le modèle de bassin atmosphérique de H. Reiquam, ou en optant pour la stratégie de la peur dans la presse et devant les membres du Congrès, dans le cas de l'ozone, en invoquant un principe de précaution comme on invoque une divinité).

En premier lieu, Scorer s'ingénie à montrer les contradictions dans lesquels s'empêtre le système politique des pays occidentaux (système qui contamine de surcroît les autres régions du monde). Il aborde les thèmes entrelacés des modes de vie (confort, consumérisme, *etc.*), de la raréfaction des ressources (dont les ressources fossiles), de l'inflation que crée « l'économie de la croissance », de l'uniformisation forcée des modes de production et de consommation, *etc*. Ce discours de politique générale de Scorer prend place au cœur de la contestation de la société de consommation et de la croissance globale, qui avait atteint un apogée dans la littérature de la fin des années 1960, et de la critique des économistes libéraux, du « laissez faire capitaliste », inaptes à prédire les chocs pétroliers puis à lui trouver des issues durables, inaptes à trouver des voies postcoloniales compatibles avec les limites en ressources, à limiter les naissances en garantissant une prospérité… et bientôt, Scorer prédit : à limiter, alors que cela sera devenu nécessaire, ses émissions de CO_2.

Ce constat s'accompagne d'une problématisation de la technologisation des questions politiques, notamment des questions environnementales. Les politiques menées sont *court-*

termistes et trop compartimentées sectoriellement, selon un modèle technicien et pro-industrialiste. Les expertises des économistes et des scientifiques de l'environnement les légitiment, les accompagnent ; elles les aident donc à se perpétuer. Or, Scorer est convaincu que ces politiques amèneront invariablement leur lot de nouvelles pollutions, d'inégalités, d'utilisation déraisonnables des « ressources » et de « destruction d'emplois », en d'autres termes : de désordre (social). Elles ne seront pas soutenables "à moyen terme", pas même en Occident.[341] [Scorer, 1972 (1), p. 32] Au-delà de leur caution donnée à de telles politiques, les scientifiques ont grand tort de ne pas s'intéresser aux théories écologiques et de sciences humaines de leur temps, notamment les travaux sur les limites des ressources et de la planète.

Le témoignage de Scorer est bien sûr à comprendre à l'aune de la mutation des discours scientifiques et politiques autour de l'atmosphère, et plus généralement les ressources et conditions d'épanouissement de l'homme (et du vivant), dans les années 1970. Il s'agit, pour Scorer, d'encourager une recherche post-Guerre froide, où l'homme serait considéré comme l'agresseur de l'environnement plutôt que sa victime, et où la recherche "destructive" serait abandonnée (puisque Scorer est, nous l'avons dit, opposé à l'ingénierie du temps et du climat). Mais, dans le nouveau « régime des sciences », l'idéal scientiste de maîtrise de l'environnement par la science ne doit pas être transféré dans le nouveau paradigme scientifique, contrairement à ce que le Britannique dit voir se produire aux Etats-Unis dans le traitement de l'affaire de la couche d'ozone ou dans la mise en place de normes de qualité de l'air par une agence spécialisée. De plus, la prise en charge des pollutions de l'air et de l'atmosphère sur une base objective comporte différents risques. D'abord, l'illusion que "se donner des objectifs suffit pour les atteindre" ! Ensuite, l'idée que les savoirs scientifiques, au fil de leur élaboration, ne finiront pas par réévaluer les objectifs de baisse des émissions vers des seuils cette fois inatteignables… Ce qui est le cas, aujourd'hui, à la fois du changement climatique, ainsi que des pollutions de l'air dans la plupart des grandes agglomérations (voir Chapitres 8 et 9).

En outre, la spécialisation, le cloisonnement des domaines d'expertise peut générer des hétéronomies, des insuffisances, des contradictions. Par exemple, les pollutions de l'air agissent parfois sur la santé d'une manière synergique, que les combustions fossiles émettent à la fois des gaz à effet de serre au bilan radiatif positif et des aérosols soufrés au bilan radiatif négatif, *etc.* (voir Chapitres 8 et 9). Bref, plutôt que chercher à générer toujours « plus de science » spécialisée, il faudrait chercher à imaginer et/ou défendre des modes de vie et

[341] Scorer insiste sur un point : la catastrophe *est déjà là*. Cet argument relève en partie d'une stratégie rhétorique de mobilisation. Il découle également du fait que Scorer décrit une situation politique comprise comme un tout structurel, qui fait donc déjà son ouvrage (depuis le XIX^{ème} siècle, à certains égards ; dans la lignée des Trente Glorieuses comprises comme Trente Pollueuses, à d'autres égards).

de consommation "sobres", à petite échelle territoriale, dont la prospérité et l'harmonie ont, selon Scorer, fait leur preuve. Enfin, les agences spécialisées de gestion des pollutions peuvent bien sûr, partiellement, se faire le relai d'une société civile concernée et consciente des enjeux à long terme. Mais, elles sont avant tout conçues comme des organes de recherche de compromis, au sein d'un système politico-économique particulier, avec ses rapports de force particulier. Elles négligent ainsi souvent de promouvoir et soutenir des économies durables, et remettent toujours au lendemain un débat contradictoire sur les implications de la modernité, de son extension, de sa radicalisation. Elles peuvent ainsi se révéler être des accompagnateurs du 'business-as-usual', donnant leur caution morale à la croissance et la consommation débridées… ce qui ne contrarie pas nécessairement, bien sûr, les aspirations de la majorité.[342]

En définitive, Scorer dénonce donc principalement deux pentes malheureuses sur lesquelles se seraient engagées les sciences de l'environnement, en pleine expansion dans les années 1970 : la *confiscation technocratique du politique ;* l'*inefficacité* (et le/car *court-termisme*) des gouvernances environnementales qu'elles légitiment à grand renfort d'expertises scientifiques coûteuses, compartimentées, et de conclusions parfois prématurées ou qui ne soulignent pas suffisamment les incertitudes. Le renversement politique que propose Scorer peut se résumer ainsi : *passer de politiques environnementales d'urgence et compartimentées, légitimées par des « consensus » scientifiques (toujours exagérés par les politiques qui les utilisent et par les scientifiques adhérant à ces « consensus »), à des politiques générales de réduction des pollutions, menées sur le moyen terme, qui renforceraient des "communautés durables*" (une vision que l'on pourrait peut-être qualifier aujourd'hui d'"altermondialiste"). Une lecture rigoureuse des écrits de Scorer révèle en effet que ses ennemis ne sont pas tant Rowland, Molina et les autres experts-lanceurs d'alerte "catastrophistes" de la destruction de l'ozone, qu'il voit comme des personnes naïves, inconséquentes scientifiquement et politiquement, voire opportunistes, que des technocrates : économistes, politiciens, ou membres de l'EPA.

Comme nous l'avons indiqué dans la Section précédente, dans les années 1990, Scorer se justifiera d'avoir décrié la peur de la destruction de l'ozone dans les années 1970 en la recontextualisant. A partir de la fin des années 1980, dira-t-il, la science de la destruction anthropique de l'ozone avait totalement muté. Elle n'avait plus rien eu à voir avec celle de la fin des années 1970, ni en matière d'objet (puisque les concentrations d'ozone aux pôles, et non plus les concentrations moyennes globales, étaient désormais au centre de toute les

[342] Dans le même temps, le citoyen devient un non-spécialiste *à informer*, c'est-à-dire *à éduquer*… Or, comme le formulera Isabelle Stengers, « ce n'est pas d'une meilleure information du public que nous avons besoin, mais de scientifiques capables de participer à une intelligence collective des problèmes. » [Stengers, 2013, entretien d'Isabelle Stengers réalisé par Pierre Chaillan le 15 juillet 2013, http://www.humanite.fr/tribunes/isabelle-stengers-la-gauche-besoin-de-maniere-vita-545901 (le 04/05/2014)]

attentions), ni de mesures, ni de modélisation numérique. Et, par ailleurs, la science du CC sera toujours insatisfaisante en 1997 (notamment, en ce qui concerne la modélisation des nuages[343]). Mais, ne nous y trompons pas, Scorer n'en conclut pas qu'il faille attendre plus de consensus, donc appeler à plus de sciences pour agir. Il mettait déjà en garde contre cette outrecuidance des scientifiques (en particulier, des modélisateurs), dans son pamphlet de 1977. Vingt ans plus tard, il a gardé la même ligne, comme lorsqu'il écrit, au sujet de l'expertise du CC :

> « [N]ous en saurons bientôt suffisamment pour nous persuader que des mesures drastiques seront – et en fait : sont – prudentes – et en fait : nécessaires – [pour contrer le changement climatique... Mais,] nous ne pouvons plus imaginer approcher progressivement une réponse exacte [au sujet des évolutions climatiques] ». [Scorer, 1997, pp. xvii-xviii]

Le scientifique et ses valeurs, dans la cité

Afin de clore ce Sous-chapitre sur "le Scorer politique", nous souhaitons revenir sur *l'omniprésence des valeurs morales et éthiques* dans le discours de Scorer. *The Clever Moron* peut être lu comme une succession d'aphorismes (les intertitres sont pour la plupart pensés comme tels) suivis de développements explicatifs succincts (les sections), regroupés en sept chapitres : 1. « Notre place dans l'histoire » ; 2. « La religion de la science » ; 3. « Le succès technologique » ; 4. « La morale publique et la religion dans un monde plein » ; 5. « Evolution » ; 6. « La pauvreté élégante » ; 7. « Pouvons-nous garder espoir ? » [Scorer, 1977 (1), pp. v-viii]. Certains aphorismes exposent les grandes lignes de la pensée politique de Scorer. Mais, chez le Britannique, elle est indissociable d'une philosophie morale. Il écrit :

> « Le problème n'est pas les droits de l'homme ou les besoins humains mais quelle sorte de gens nous voulons être »
>
> « Les riches servent à multiplier les aspects les plus bas de notre culture »
>
> « [L]es consommateurs de masse ne sauraient contribuer à l'évolution »
>
> « L'éducation est un sujet moral »
>
> « [L]e PNB est une mesure de notre inefficacité à vivre »[344]

[343] Il semble que le changement climatique soit, en tout cas à partir des années 1990, la principale préoccupation environnementale de Scorer – alors que ses travaux de météorologistes des pollutions de l'air portent plutôt sur les pollutions régionales et non les GES… même s'il est vrai que Scorer insère volontiers ses travaux, nombreux, sur les nuages, dans la science du changement climatique (il réitère à maintes reprises, des années 1970 aux années 1990, que, dans la science du changement climatique, la modélisation des nuages est un enjeu majeur, mais hélas très imparfaite, là où la modélisation de l'effet de serre lui inspire confiance (en tout cas, à la fin des années 1990, dans Scorer, 1997).

[344] Autre citation, plus longue, que nous reproduisons telle quelle, dans la langue de Scorer :

> "The wicked nonsense of the growth philosophy which appealed to greed alone took no account of the wisdom of the ages concerning the joy deriving from striving, the limitations of man, the origins of

« La vie ne peut pas être planifiée »

« Définir les valeurs les rend bêtes ('foolish'). Elles sont le point culminant de la vie ('the high point of life'), et non le point de départ de la logique »

« Il n'y a pas de substitut à l'amour – et à l'humilité »

[Scorer, 1977 (1), pp. 166, 150, 131, 89, 28, 86, 109, 154-155]

D'autres phrases renferment des maximes morales à l'attention des sciences et de la communauté scientifique :

« L'ethos de l'écologie est nié par nos économies politiques ('economics') »

« [L]'homme a cherché à consommer la beauté ; la science a cherché à le soulager du fardeau de la créer » ('Man has sought to consume beauty ; science has sought to relieve him of the burden of creating it')

[Scorer, 1977 (1), pp. 146 & 56]

Parfois, Scorer s'adresse à l'homme-scientifique "dans son intégralité", l'enjoignant de se questionner sur la pertinence à continuer son activité professionnelle routinière de collecteur et de consommateur de données, et d'utilisateur de calculateurs… Il écrit :

« Trop de scientifiques sont désorientés par une pléthore de faits. Ils ont un travail à faire et cela les tient occupés, et souvent les paie bien, mais ils prennent simplement part à une ruée sans but ('they are simply part of an aimless stampede'). [...] Bien sûr, beaucoup de scientifiques sont pleinement conscients qu'ils sont une partie d'une machine que personne ne dirige mais que tout le monde aide à continuer à avancer ; mais ils ne parviennent pas à se désengager. Leur formation doit être utile [, estiment-ils,] et puisqu'il n'y a pas d'autre moyen pour eux de rendre service, ils pensent ('feel') que le mieux est d'aider les choses à se perpétuer plutôt que de les laisser devenir inefficaces voire obsolètes. »

En outre, le scientifique

« rationalise son instinct le plus rudimentaire ('basic'), celui de conserver son travail et les moyens de nourrir sa famille. Il ne peut se désengager parce qu'il ne peut subvenir suffisamment longtemps à ses besoins de lui et à ceux de sa famille pour se mettre en route vers une autre vie ('to set himself on a different course of life'). »

Scorer poursuit avec deux paragraphes "nomades", qui convient des arguments issus de champs intellectuels multiples, et opposent à nouveau science de terrain et science de laboratoire / de modélisation :

---

happiness, the nature of beauty. It discounted it all as a philosophy born of privation, frustration, eternal poverty and misery. Capitalism and Marxism joined in advocating the rape of the earth." [Scorer, 1977 (1), p. 19]

« L'existence de machines à données ('data machines') donnent un prestige ('a status') à ceux qui les utilisent parce que leur travail apparaît comme étant fondé sur une base plus substantielle de faits corrects que le travail de ceux qui font à peine plus qu'utiliser leurs yeux nus et leurs mains, et penser. Si ceux qui travaillent à l'étude de la migration des oiseaux venaient à dire « Plus j'étudie les oiseaux, plus le mystère se creuse, plus je suis alarmé par l'interférence brute et aveugle de l'homme avec le merveilleux monde naturel dont il n'est [(*sic* ; comprendre : « je ne suis »)] qu'une simple partie », on pourrait dire que la science nous a appris comment vivre.

« Mais la science ne leur enseigne souvent rien. Elle les fait prendre part à des exercices coûteux de collection et de prétendue analyse des données, qui sont pensés pour répondre à des questions dont on découvre en principe ('usually') plus tard qu'elles ont été les mauvaises. 'Comment les oiseaux se dirigent-ils ?' est une question aussi importante ('leading') que 'Avez-vous cessé de battre votre femme ?' Penser au vol des oiseaux en termes de concepts très artificiels et extrêmement récents de navigation est assez inapproprié. Probablement 80 pour cent des [individus issus des] couvées réussies d'une année fructueuse font ce que leurs parents leur disent, et 'se perdent' ! » [Scorer, 1977 (1), pp. 45-46]

Le style est pour le moins déroutant !… Resterait à savoir dans quelle mesure Scorer a su se plier à ses propres maximes ;[345] et surtout, s'il reconduirait ses critiques aujourd'hui, à l'heure où les scientifiques de l'atmosphère et du climat sont beaucoup présents dans les arènes médiatiques et politiques.

Le pamphlet de 1977 témoigne du fait que Richard Scorer a été très marqué par les critiques "sociales" et "artistes" des années 1960-70 (anti-productivimes/consumérisme, environnementalisme, néo-ruralité). Certaines sont à l'attention de ses pairs scientifiques. La teneur de son argumentaire n'est pas sans rappeler des débats post-68 en France sur la forme nouvelle à donner à la recherche scientifique ou sur le rôle sociétal des sciences, débats qui se déroulaient en partie au sein-même de la communauté scientifique, qu'ils divisaient.[346]

Il n'est pas rare que Scorer adopte une position d'intellectuel "au-dessus de la mêlée". Inscrire son nom sous le texte "environnementaliste" *A Blueprint for Survival* (1972), dont la majorité des signataires sont des scientifiques et intellectuels, ne relève-t-il pas de cet élan ? Même dans son pamphlet de 1977, qui vise pourtant en premier lieu à créer un "électrochoc" moral ainsi qu'à contester l'autorité de certains savoirs (scientifiques, religieux), il s'oppose

[345] Nous n'avons hélas pas trouvé de matériau biographique sur Scorer. Lorsque le météorologiste écrivit *the Clever Moron*, il avait déjà presque soixante ans (il est né en 1919).
[346] Nous renvoyons par exemple aux travaux de Renaud Debailly sur le sujet.

souvent aux "irrationnels" (qu'il nomme souvent : « idéalistes ») [Scorer, 1977 (1) ; Scorer, 1972 (1), p. 33]…

Nous avons fait l'expérience de la lecture du programme politique général de Scorer (qui n'est d'ailleurs nullement original, mais est une position très rare *pour un scientifique de l'atmosphère*) ; une question demeure, toutefois : quelle échappatoire pour les scientifiques ?; quelle attitude les scientifiques de l'environnement doivent-ils adopter, par exemple, face aux procrastinations de décideurs politiques ou en cas d'impasse dans une nécessaire coopération internationale sur des réductions d'émissions polluantes ? Doivent-ils imaginer des savoirs moins tournés vers l'aide à la décision des élites politiques nationales ou aux grands projets onusiens dits de développement ? Doivent-ils entamer une "grève des savants" ?... Ces questions se poseront de nouveau à nous au sujet des scientifiques face aux errements des politiques du changement climatique, dans le Chapitre 9.

5.4. L'armistice de la guerre de l'ozone

Le travail d'E. Conway et N. Oreskes ne vise pas à décrire de manière raffinée les types de "tournants environnementalistes" des années 1970 (et au-delà), et passe par exemple à côté de l'entreprise de R. Scorer, celui-ci étant décrit de manière biaisée comme un « 'professor' de mécanique théorique à l'Imperial College [… qui aurait] martelé que les activités humaines étaient trop faibles pour avoir le moindre impact sur l'atmosphère [, …et dont] le lien avec le lobby industriel avait [, dieu merci, été rapidement] mis à nu par un reporter du *Los Angeles times* », le mettant hors d'état de nuire [Conway & Oreskes, 1975, p. 114]. Conway et Oreskes voient par contre que, au cours des années 1970 aux Etats-Unis, si les industriels états-uniens finirent par subir la réglementation de certains CFC en 1978, en partie parce que leur science de contre-expertise avait été prise de vitesse par les experts regroupés dans le CIAP, ils ne perdirent pas totalement la partie.

En effet, l'industrie états-unienne fut efficace dans son chantage social : risques de licenciements, de délocalisation, de crise économique nationale encore accrue… Ces arguments pesaient d'autant plus lourd que la controverse sociotechnique se déroulait dans l'onde de choc de la première crise pétrolière. L'industrie minora sa capacité à développer des alternatives aux CFC. Les industriels parvinrent en outre à structurer le débat en termes de santé publique ; en d'autres termes, ils requirent des expertises épidémiologiques et toxicologies qui étaient plus encore controversées que les corrélations entre destruction de l'ozone stratosphérique et changement climatique (et le demeureraient longtemps – voire toujours, puisque la question fait encore débat – voir Chapitre 7). En définitive, si les

industriels états-uniens finirent par subir la réglementation de certains CFC (entrée en vigueur en 1978), en partie parce que leur science de contre-expertise avait été prise de vitesse par les experts regroupés dans le CIAP, ils purent et surent néanmoins négocier une sortie de crise à moindre frais.

Une défaite partielle pour l'industrie états-unienne des CFC

En 1974-75, ni la communication médiatique ni les arguments des experts financés par l'industrie privée ne parviennent à semer le trouble dans le reste de la communauté des sciences de l'atmosphère. En tout cas, la NAS ne cesse de réitérer ses alertes au cours des années qui suivent. En septembre 1976, les rapports commandés par le Président de la NAS, signés par la NAS, la NASA, la NOAA, la NSF (auquel est rattaché le NCAR, notamment) ou encore l'EPA, réaffirment que l'accumulation de CFC dans l'atmosphère va induire des baisses moyennes d'ozone à l'échelle globale. La conclusion la plus mise en avant est une estimation qui fait l'expérience de pensée d'émissions continues aux niveaux de 1973 dans les années à venir ; le cas échéant, les différentes modélisations numériques estiment que, dans l'hypothèse d'un état d'équilibre atmosphérique, la perte d'ozone « la plus probable » sera en définitive comprise dans une fourchette de 6 à 7,5%, et qu'une multiplication par deux des émissions de CFC induira une destruction d'ozone deux fois plus importante (estimations plus faibles que les premières prédictions, quatre ans plus tôt, mais tout de même alarmantes). Dans son rapport *Halocarbons : Environmental Effects of Chlorofluoromethane Release* (NAS, 1976), le 'Committee on Impacts of Stratospheric Change' se permet même une courte prescription adressée à la sphère politique : « pas plus de deux ans ne d[evraient] être accordés » avant une réglementation des CFC. L'interdiction des CFC dans les bombes aérosols aux Etats-Unis sera votée dès 1977, et deviendra effective l'année suivante. [Parson, 2003, p. 38 & 91]

Entre 1974 et 1978, scientifiques, élus fédéraux et acteurs de la société civile (par exemple, le NRDC (Natural Resources Defense Council), l'ONG de Thomas Stoel, fait circuler des pétitions aux Etats-Unis contre l'utilisation des CFC dès novembre 1974), réalisent en outre un travail de mobilisation, de pression et d'information / d'éducation. De plus, à partir de 1977, des états, pays scandinaves et Canada en tête, ont montré l'exemple à suivre en réglementant les bombes aérosols (par exemple, le 15 décembre 1977, la Suède bannit totalement l'utilisation des bombes aérosols contenant des CFC), et ont fait pression sur le principal pays émetteur de CFC, les Etats-Unis.[347] Néanmoins, dans d'autres pays

[347] Ces points ne sont pas développés ici. Pour les dernières années de la « guerre de l'ozone » (1976-78), voir, par exemple, Parson, 2003, pp. 31-55, dont nous utilisons ici les résultats, ou encore Dotto & Schiff, 1978 ou Litfin, 1994, chapter 3, pp. 9-10. Nous nous sommes focalisés exclusivement sur la constitution, dans l'urgence d'une

européens, au Royaume-Uni et en Allemagne notamment, les industriels parviennent à faire entendre leur mécontentement, trainent les pieds [Andersen & Sarma, 2002, pp. 374-376 ; *New Scientist*, 1975, p. 18].

Aux Etats-Unis, la riposte de l'Industrie se fait, nous l'avons dit, principalement par voie de presse. Elle cible, nous l'avons vu, en priorité les lanceurs d'alerte Rowland et Molina, alors même qu'une expertise collective a été mise en place (certes, principalement publique…), qui soutient les résultats des deux chimistes. Toutefois, en 1976, la situation est devenue intenable pour DuPont et ses alliés. Le cadrage temporel imposé par la NAS et l'EPA offre très peu de temps à l'expertise industrielle de se développer. Celle-ci échoue à mettre en doute les constantes de réaction utilisées dans la thèse chimique de Molina et Rowland (DuPont compte pourtant dans ses rangs plusieurs chimistes de laboratoire, réunis autour de McCarthy), ni à convaincre les élus du Congrès que la théorie de la destruction de l'ozone par les CFC est très lacunaire, et notamment qu'elle s'appuie sur un nombre très faible de mesures *in situ*.

De surcroît, les études des chercheurs privés, aidés notamment par J. Lovelock, confirment l'accumulation rapide des CFC dans l'atmosphère, ce qui est parfois ressenti comme un motif d'action en soi dans les sphères politique et scientifique, dans l'attente d'expertises plus fournies sur une éventuelle destruction subséquente de la couche d'ozone – selon un principe de précaution, donc. Enfin, à l'image de leur Lettre du numéro du 12 décembre 1975 de *Science*, S. Rowland et M. Molina ne laissent passer aucune communication ambiguë de DuPont qui laisserait entendre que leur alerte sur la destruction de l'ozone par les CFC est douteuse, ou qu'elle est surinterprétée et ne pousserait pas à une action politique rapide (rapide ne signifiant pas « immédiate », préciseront Molina et Rowland). Les membres du groupe d'experts de la NAS sont également sur la défensive, et prennent garde d'éviter tout écart de communication.[348]

---

expertise publique et d'une expertise alternative des industries privées, dans les années 1970. Mais, le soutien de membres de l'élite politique états-unienne et de l'EPA en faveur de réglementations rapides des CFC mériterait par exemple une étude.

[348] Harold Johnston rapporte néanmoins une « imprud[ence] » d'un membre du premier panel d'experts de la NAS, qui s'était réuni fin octobre 1974 :

> "Some members of the Congress asked the NAS for a statement on this question. I was one of five members of the NAS that met on October 26, 1974, to comment on this development. […] However, t]wo things happened to prevent our report and recommendations from ever being released: First, one member of the panel unwisely talked to newspaper reporters, from which came the headline, "Halt urged in buying spray cans that might hurt ozone", and representatives of the chemical industry sent powerful objections to NAS. Second, the November issue of *Aerosol Age* did not address the scientific issues that had raised, but slandered [those] scientists [… who had made] "sensationalized and premature announcements." [Johnston, 1992, pp. 28-29]

Nous avons déjà fait allusion à cet évènement plus haut.

En résumé, entre 1974 et 1978, la position de la puissante industrie états-unienne des bombes aérosols et des réfrigérants est des plus gênantes. Sa recherche sur l'atmosphère, y compris du géant DuPont, est encore rudimentaire. Et, malgré les efforts de DuPont et de ses homologues états-uniens sur plusieurs fronts, les industriels des CFC ne parviennent pas à repousser la mise en place d'une première réglementation contraignante nationale sur les CFC en 1978. L'industrie des CFC n'a pas eu le temps de développer une contre-expertise suffisamment rapidement, après l'alerte de Molina-Rowland fin 1974. « Développer une réponse coordonnée et sophistiquée au problème [scientifique de la destruction de l'ozone par les CFC] prit deux années aux industries menacées, espace de temps pendant lequel ils perdirent la bataille des bombes aérosols », conclut Edward Parson [Parson, 2003, p. 32].

Toutefois, les industriels états-uniens des CFC surent négocier efficacement la sortie de crise. La réglementation de 1978, qui constitue un amendement du 'Clean Air Act', renvoie à plus tard la réglementation des fluides de réfrigérateurs et de climatisation, des solvants, *etc*. contenant des fluorocarbures. Elle ne bannit même qu'une partie seulement des bombes aérosols contenant des CFC. Les réglementations, négociées à partir de la fin du mois d'octobre 1976 et validées le 15 mars 1978 par les trois agences de réglementations mandatées (EPA, 'Food and Drug Administration', 'Consumer Products Safety Commission'), se limitent en effet à l'interdiction des bombes aérosols dites « non indispensables ('non essential') », selon la formule consacrée. Ajoutons toutefois que, si de nombreuses dérogations furent demandées, très peu furent accordées. Elles furent délivrées seulement pour des médicaments prescrits sur ordonnance et des contraceptifs, c'est-à-dire en définitive pour 11 kilotonnes de production annuelle de bombes aérosols, ce qui représentait moins de 5% de la production. [Parson, 2003, pp. 39-40 & 304]

Pourtant, des substituts aux bombes aérosols aux CFC se trouvaient sur le marché, et la mutation vers d'autres types de bombes aérosols ne représentait pas un défi économique immense, en tout cas pour une entreprise de la taille de DuPont. En fait, dès la publication du brouillon du texte réglementaire en octobre 1976, l'utilisation d'aérosols aux CFC avait chuté de presque trois quarts aux Etats-Unis, sous l'impulsion des consommateurs, ainsi que de certains producteurs de bombes aérosols et de concepteurs d'emballages, que les pouvoirs publics états-uniens et la société civile étaient parvenus à inciter au changement. De nouvelles innovations suivirent. 'The Precision Valve Company', qui était pourtant l'un des opposants les plus féroces à l'interdiction des CFC, dévoila un nouveau système de propulseur aérosol sans CFC le lendemain-même de la parution du brouillon, rapporte E. Parson. Et, en définitive, conclut l'historien, « bien que [cette] première guerre de l'ozone aux Etats-Unis fût farouche, sa résolution fut remarquablement rapide, simple, et

apparemment raisonnable [– même si l'Industrie fit pression jusqu'au 15 mars 1978, date de l'entrée en vigueur de la première réglementation, et même au-delà –], éliminant à faible coût la moitié de la contribution états-unienne au risque de destruction de l'ozone. » [Parson, 2003, p. 40]

Nous revenons en détail en détail sur les raisons de cet armistice américain dans la section suivante. Soulignons à ce stade que, notamment parce qu'il n'existait en Europe aucun antécédent de controverse sociotechnique sur la destruction anthropique de l'ozone sur les avions supersoniques (ni sur les navettes spatiales, si l'on peut parler à leur sujet de controverse sociotechnique et non simplement de discussions collégiales entre collègues scientifiques…), les débats dans l'arène politique états-unienne tranchaient de manière radicale avec ceux au sein des grands pays ouest-européens. E. Parson résume ainsi les positions des pays puissamment industrialisés qui, au contraire des pays scandinaves, des Etats-Unis et du Canada refusèrent jusqu'en 1980de réglementer l'utilisation des bombes aérosols aux CFC : les autorités japonaises ignorèrent le problème, repoussant toute initiative bilatérale ou multilatérale ; l'URSS encourageait la recherche sur la couche d'ozone mais, à ce stade, les inquiétudes au sujet de la destruction d'ozone n'impliquaient pas de prendre des mesures ; en Allemagne de l'ouest, le gouvernement de Helmut Schmidt repoussa l'échéance malgré les appels pressants à légiférer de l'Agence pour la recherche environnementale ('Umweltbundesamt', UBA) ; en France et en Italie, les officiels laissèrent à ce stade le problème en suspens (ce qui revenait à faire de le jeu de leurs industries de CFC) ; quant au gouvernement du Royaume-Uni, qui à l'inverse des pays précédemment cités devait faire face à une pression citoyenne significative en faveur de réglementations, il cherchait à garder la main en développant une expertise scientifique propre (un rapport d'expertise britannique parut en avril 1976), mais montrait une grande sollicitude à l'égard de son industrie chimique nationale, au sommet de laquelle trônait la société 'Imperial Chemicals Industries' (ICI). Sous la pression du Royaume-Uni, de l'Italie et de la France, la Commission économique européenne restait sourde aux revendications de réglementation des CFC et refusait de prendre une décision sur la base des rapports états-uniens (avant que, finalement, au mois de mars 1980, la CEE ne demande à ses membres de plafonner leur capacité de production de CFC et de réduire leur production de produits aérosols au CFC de 30% avant la fin de l'année 1981). [Parson, 2003, p. 44 ; Sarma & Andersen, 2002, pp. 375-377][349]

Revenons à l'industrie états-unienne. Dans la Figure 31, qui referme le chapitre, nous avons reproduit un article du *New Scientist*, daté d'octobre 1975, qui expose les principales

[349] Au sujet des débats sur les CFC hors Etats-Unis, et des premières tentatives de coopérations bilatérales et internationales, nous renvoyons le lecteur à la synthèse que fait Edward Parson dans son Sous-chapitre "3.3 Aerosol Debates Outside the United States and Early Efforts at International Cooperation" (Parson, 2003, pp. 43-53).

stratégies des industriels pour faire pression sur leur gouvernement et repousser l'interdiction des CFC. Certaines industries états-uniennes se plaignent d'être pénalisées par rapport à leurs homologues étrangères. Elles dénoncent ce qu'elles nomment un « facteur peur » propre aux Etats-Unis, dont résulterait pour le pays un handicap supplémentaire, dans une période de crise économique déjà pénible. Un journaliste du *New Scientist* rapporte :

> « Vincent J. Marriot, vice-président de 'Continental Can Co.', dit que la controverse avait déjà blessé l'industrie. Les cargaisons de bombes aérosols aux Etats-Unis étaient déjà en recul de plus d'un quart dans la première moitié de 1975, par rapport à la période similaire de 1974. [... Une autre source industrielle, toutefois,] pensait que la récession aux Etats-Unis demeurait le facteur principal – comme pour la baisse de 6 pourcent dans les ventes d'aérosol en 1974. [Mais, elle] confirma que le déclin des ventes d'aérosols avait été en grande partie limité aux Etats-Unis. [... En outre,] le 'Domestic and International Business Administration' de l'US Department of Commerce' a[vait] calculé qu'une interdiction de l'utilisation des fluorocarbones à partir de 1978 pourrait coûter des milliards de dollars et avoir un effet négatif sur l'emploi de millions de travailleurs. »

Parallèlement, le dossier spécial du *New Scientist* met en exergue le fait que beaucoup d'industries misaient déjà sur les technologies alternatives aux CFC. De fait, en 1977, le Président de la 'Food and Drug Administration' Donald Kennedy annonça de prochaines réglementations sur les bombes aérosols aux CFC. Au cours de l'année qui suivit, la vente de ces produits enregistrera une chute spectaculaire de 75% [Oreskes & Conway, 2010, pp. 116-118]. L'annonce d'un possible bannissement partiel voire total des CFC en 1978 avait en effet déjà été effectuée par les agences scientifiques fédérales en 1975 (la décision dépendrait des résultats de l'expertise en cours, prise en main par la NAS). Et, avec elle, s'était produite *une première vague de mutations* dans l'attitude des consommateurs et dans la stratégie des industriels, rapportait le *New Scientist*. « Dans les deux premiers tiers de l'année 1975, « la controverse a[vait] déjà généré des effets visibles sur l'industrie américaine. L'un [fut] la mutation [massive] vers des formes alternatives d'emballage de produits aérosols. […] Les fabricants de pompes mécaniques de propulsion travaillaient [ainsi], semblait-il, à pleine capacité, […] des publicités à la télévision états-unienne a[vaient] commencé à mentionner l'absence de propulseurs [aux CFC] dans leurs produits […, et] les aérosols utilisant des propulseurs autres que les fluorocarbones commen[çaient] à se faire connaître. » En juin 1975, 'Johnson Wax', la cinquième industrie de bombes aérosols du pays, avait annoncé qu'elle allait arrêter d'utiliser des CFC dans ses produits. [*New Scientist*, 1975, pp. 17-18 ; voir Figure 31 *infra*]

Le *New Scientist* relevait par ailleurs que l'utilité des bombes aérosols avait elle-même été questionnée (ce qu'avait déjà fait 'Friends of the Earth' dès 1973, précisons-nous, après avoir eu vent du fait que les CFC s'accumulaient dans l'atmosphère) :

> « « Les aérosols sont la forme ultime de suremballage. Avec tous les problèmes [environnementaux] que nous avons [déjà], nous avons du mal à comprendre la logique d'utiliser de tels aérosols. Il s'agit d'un produit inutile », avait déclaré Barbara Hogan, de [l'ONG] 'American Center for Science in the Public Interest' à un reporter de *Business Week* [au cours de l'année 1975] » [*New Scientist*, 1975, pp. 17-18; voir Figure 31 *infra*]

Pourtant, nous verrons que les grandes industries états-uniennes des CFC – et peut-être plus encore : ouest-européennes – défendront bec et ongles leur activité. Jusqu'au moment où DuPont finira par emboîter le pas des diplomates états-uniens, en 1987, elles n'auront de cesse de rappeler le déficit de données atmosphériques pertinentes, de mettre en doute la gravité des risques inhérents aux émissions de CFC, et de souligner la prétendue absence de substituts idoines et bon marché.

Clôture multifactorielle de la controverse, et héritage

Revue à la baisse des chiffres de production de CFC et des estimations de destruction d'ozone

Dans les années qui suivront les premières réglementations de 1978, l'EPA devra faire face à de multiples controverses, dont certaines internes, et subira les assauts des anti- comme des pro-réglementations (voir Litfin, 1994, pp. 11-18 of Chapter 3). L'année 1978 ne marque en effet pas la fin de la controverse états-unienne sur les CFC. Par contre, elle la fait indubitablement rentrer dans une nouvelle phase, plus apaisée, moins médiatisée. En 1978, après quelques années d'intense controverse à l'intérieur et à l'extérieur de la communauté scientifique aux Etats-Unis, à la suite de l'alerte de Rowland et Molina (1974), la guerre de l'ozone est « refroidie » par plusieurs facteurs, comme le formule E. Conway [*Cf.* 'the cooling of the ozone war' ; Conway, 2008, p. 147].

Il y a, pour commencer, cette maigre mais coercitive réglementation fédérale des CFC dans les bombes aérosols, entrée en vigueur en 1978. Elle est certes limitée à une petite partie des produits contenant des CFC ; mais, elle s'attaque tout de même à une majorité de bombes aérosols aux CFC, alors que, dans d'autres pays très industrialisés, européens notamment, on se refuse toujours à toute réglementation. De plus, cette réglementation états-unienne vient se surajouter à l'abandon du projet de flotte d'avions supersoniques aux Etats-Unis en 1971. Si les officiels du pays peuvent se glorifier d'avoir mené précocement deux

politiques environnementales en faveur de la couche d'ozone, et d'en être par conséquent son premier protecteur (ce qui est profondément hypocrite, puisque l'abandon des SST n'avait guère été motivé par la protection de la couche d'ozone), les industriels états-uniens s'indignent quant à eux volontiers de la force du lobbying des environnementalistes dans leur pays.

Ensuite, tout comme les estimations de destruction d'ozone par les SST avaient fondu au cours des années 1970, les modèles de destruction d'ozone par les CFC avaient revu les premières estimations (de 1974) à la baisse. Les estimations de destruction d'ozone du modèle de Molina et Rowland de 1976, par exemple, étaient inférieures à celles de 1974.[350]

[350] Ces nouvelles estimations de 1976 affaiblirent quelque peu l'expertise de la NAS rendue fin 1975. Toutefois, le couple NAS-EPA parvint à faire adopter les réglementations dès 1978. Karen Litfin a fait l'hypothèse, que le principe de précaution l'avait emporté d'autant plus facilement que les arguments scientifiques des industriels étaient peu crédibles, et que développer massivement des substituts aux CFC ne semblait pas être synonyme pour les industriels états-uniens concernés de "creuser leur tombe". Nous reproduisons ci-dessous le récit qu'a produit la sociologue ; il offre un complément à notre récit, qui est plutôt focalisé sur la période 1974-75 voire 1974-1976, et laisse sur la touche de nombreux évènements des années 1976 à 1978 :

> "Rowland and Molina soon discovered that the photochemistry was more complicated than they had originally believed. They ascertained that chlorine and nitric oxides could combine in the stratosphere to create chlorine nitrate (ClNO3), thereby forming "reservoirs" that would retard the ozone depletion rate by both chlorine and nitric oxides (Rowland and Molina 1976). They concluded that previous estimates of ozone destruction were too high, leading some to accuse the scientists of alarmism (Dotto and Schiff 1978:255). The new discovery prompted the National Academy of Sciences to postpone the release of its final report for several months.
>
> "The report, reflecting the new data, cut the estimate of ozone depletion in half, from 14 percent in an early draft to 7 percent. Even so, the report's policy recommendations to defer a regulatory decision seemed flimsy in light of its conclusion that continued releases of CFCs at 1973 levels could reduce ozone in the upper stratosphere by as much as 50 percent (National Research Council 1976). Rowland later lamented that the report "established a debilitating precedent at a crucial time in the whole affair when [it] advocated a delay in regulation" (Brodeur 1986:80). Industry, of course, claimed that the report vindicated its own position.
>
> "It is worthwhile to consider the scientific merit of the main arguments used by detractors of the ozone depletion theory in the early years, for these persisted throughout the controversy. The least sophisticated argument was that, because ozone varies greatly under natural conditions, a decrease of several percentage points globally would not be disastrous. The fallacy in this logic is seen clearly by analogy with temperature. While a ten-degree change in one place on any given day is of no great concern, a decrease of ten degrees averaged globally would be catastrophic.
>
> "Industry also seized upon reports that ozone had increased over the Northern Hemisphere during the 1960s to undermine the Rowland-Molina hypothesis. There are three problems with this line of reasoning. First, many scientists attributed the increase in ozone to the ban on atmospheric testing of nuclear weapons early in the decade. Second, the increases might have been greater without CFCs during that period. Third, and most notably, industry's reasoning ignored the fact that the effects of CFCs are delayed because of their long atmospheric lifetimes. This point later became immaterial as satellite data indicated declining ozone levels in the 1970s and 1980s.
>
> "A third fallacy is the exaggeration of the "self-healing effect." As ozone is destroyed in the upper atmosphere, more ultraviolet light enters the lower atmosphere, where it is absorbed by diatomic oxygen molecules to make more ozone. But each ozone molecule destroyed in the upper stratosphere is not matched by a new one further down. Besides, the computer models had already incorporated the self-healing process, which is why they had predicted so much more depletion at the poles: the self-healing effect drops off as the intensity of ultraviolet radiation decreases with latitude. Furthermore, even if sufficient replacement ozone were produced, there would be no guarantee that it would rise up to exactly those spots where the layer had been weakened. Moreover, redistributing ozone would alter stratospheric temperatures, possibly precipitating dramatic climate changes. With the discovery in 1975 that CFCs are extremely potent greenhouse gases, the link between ozone depletion and climate change became increasingly salient (Ramanathan 1975).
>
> "Despite the academy's indecisiveness in its 1976 report, Russell Peterson, chairman of the President's Council on Environmental Quality declared that "we cannot afford to give chemicals the same constitutional rights that we enjoy under the law; chemicals are not innocent until proven guilty" (Brodeur 1986:74).

Parallèlement, la 'Chemical Manufacturers Association' annonça des chiffres de production de CFC-11 et CFC-12 en nette baisse, à la fin des années 1970 (la principale cause, avérée, étant la crise économique qui suivit le second choc pétrolier). Puis, les nouvelles techniques de mesure en laboratoire et dans l'atmosphère, effectuées par la communauté internationale de l'ozone, firent passer les estimations modélisées de destruction d'ozone de 15% à 5-10%, entre le deuxième 'Ozone Layer Bulletin' de juillet 1978 et la cinquième session du 'CCOL' ('Coordinating Committee on the Ozone Layer', financé par l'UNEP ; voir Chapitre 7) à Copenhague en octobre 1981.[351] Les taux de destruction moyenne globale de la couche

---

Considering that he had been a Du Pont chemist for over twenty years, his request that federal agencies develop plans to regulate CFCs was remarkable. Peterson's voice was added to an emerging environmental policy discourse premised on what has come to be known as the "precautionary principle," i.e., that, in the face of scientific uncertainty, regulators should act to prevent harm rather than wait until damage occurs (Bodansky 1991).

"In its amendments to the Clean Air Act in 1977, Congress called upon the EPA administrator to regulate any substance "which in his judgment may be reasonably anticipated to affect the stratosphere," thereby mandating preventive action based on the best scientific knowledge available. 7 The fact that empirical evidence of ozone destruction need not precede regulatory action later became an important factor in formulating the U.S. position during the international negotiations.

"The 1977 legislation also required the United States to try to convince other nations to adopt regulations mirroring its own. Only Canada, Sweden, and Norway, all of which were heavily influenced by the 1976 academy report, followed the U.S. lead in implementing an aerosol ban (Stoel 1983:59). Despite pressure from the USA, the European Economic Community (EC) refused to adopt an aerosol ban. The British and the French were most resistant and remained so during the later negotiations (Jachtenfuchs 1990). The lack of success abroad was one reason that the EPA's proposed reductions in nonaerosol uses of CFCs never went beyond a notice in the Federal Register. Other factors included the lack of readily available substitutes and diminished public interest following the aerosol ban.

"Despite industry's protests that no substitutes were available, the day after the aerosol phaseout was announced, Robert Abplanalp, inventor of the original aerosol spray valve and a vocal critic of the Rowland-Molina hypothesis, unveiled a new propellant to replace CFCs (Roan 1989:85). The hydrocarbon substitutes were used in the United States after 1978 but were not adopted abroad on a large scale until after the Montreal Protocol went into force.

"The events leading to the aerosol ban set a pattern that continued throughout the ozone controversy: industry questioned the science and claimed that no replacements for the risky chemicals were available, but once the regulations were in place, substitutes quickly came on the market. The availability of substitutes, then, has typically been more contingent on the dominant policy discourse, translated into market signals, than on any scientific or technical factors.

"Although the CFC-ozone controversy receded into the background politically during the late 1970s and early 1980s, it continued to receive substantial scientific attention." [Litfin, 1994, "chapter 3, pp. 9-11 of 18] Voir également Parson, 2003, pp. 43-53.

[351] Par contre, relate Litfin, les prévisions de destruction d'ozone avaient été revues très à la hausse dans un rapport de la NAS de 1979 :

"[In the late 1970s,] reaction rates were being revised. In 1977, two researchers found that nitrogen oxides and hydroxides would react forty times faster than previously believed (testimony by Dr. Rowland; U.S. Senate 1987b:5D6). This implied that nitrogen would be inactivated more quickly, thereby decreasing the amount available to form reservoirs of chlorine nitrate. Thus, ozone could be depleted much faster than either Rowland and Molina or the National Academy of Sciences had predicted in 1976.

"The 1979 NAS report, taking these findings into account, painted a bleak picture, predicting as much as 16.5 percent depletion by the end of the next century. It also included much more information on climate change and the potential for increases in skin cancer, disruption of the aquatic food web, and crop damage. The report concluded with a sense of urgency, declaring that CFCs should be regulated beyond the aerosol ban already in place (National Research Council 1979).

"In the same year, [however,] Britain's Department of the Environment released a much more equivocal study (U.K. Department of the Environment 1979). While confirming the 16 percent depletion estimate, this report vacillated by emphasizing that the ozone depletion theory was still a mere hypothesis. It concluded by calling for more research before taking action." [Litfin, 1994, "chapter 3, p. 11 of 18]

d'ozone prédits fondirent ainsi comme neige au soleil dans les rapports du CCOL : ils passèrent de 15% (CCOL n°3 ; Paris, 1979) à 10% (CCOL n°4 ; Bilthoven, 1980), puis à 5-10% (CCOL n°5 ; Copenhague, 1981) et à 3-5% (CCOL n°6 ; Genève, 1983).[352] [Conway, 2008, pp. 147-148 ; Andersen & Sarma, 2002, pp. 49 & 52].

Au début des années 1980, la mobilisation médiatique était au plus bas. « Vers 1984 ('by about 1984' (*sic*)), confiera Susan Solomon, l'inquiétude sur la possible destruction de la couche d'ozone avait certainement atteint un minimum, par rapport aux premières années » de la mobilisation, dans les années 1974-78 [Solomon, 1988, « 1988 NRC report », p. 131 **in** Christie, 2000, p. 35]. L'agitation médiatique autour de l'action chimique de l'homme sur la couche d'ozone reviendra à partir de 1983, lorsqu'il sera annoncé que les émissions de CFC étaient reparties à la hausse au cours de l'année 1980-81 (lors de la séance du CCOL de 1983) ; et surtout, en 1985, avec la signature du Convention internationale pour la protection de l'ozone à Vienne, ainsi que l'annonce d'une spectaculaire destruction de la couche

[352] L'expertise sur les émissions de CFC et l'inhérente destruction d'ozone ne se résumait bien sûr pas aux rapports tirés des réunions internationales du CCOL. Nous ne pouvons développer ici. Voici le résumé de l'évolution de l'expertise états-unienne que fait Karen Litfin – qui témoigne notamment du fait que la question du CC (les CFC comme GES) était présente dans les rapport du NRC du début des années 1980 :

> "By the mid-1980s, the consensus was that ozone levels had remained essentially stable during the 1970s (Science Impact 1987). […]
>
> "In 1981, a newly released international ozone trends study [had] found no clear evidence of actual ozone loss but predicted that ozone would be depleted between 5 and 9 percent by the second half of the twenty-first century (WMO 1982). The new figures were based on refined chemical reaction rates and better data on the interactive effects of CFCs, carbon dioxide, nitrogen oxides, and methane. The NASA/WMO analysis also painted a more ominous picture of the biological and health effects than had past reports. A year later, the National Academy of Sciences published its third report, echoing much of the NASA/WMO analysis. Despite the bleak forecast, newspapers optimistically proclaimed that the danger was not as great as was previously believed. But this rosy picture only made sense in contrast to the 1979 prediction of 16.5 percent depletion.
>
> "A fourth academy report in 1984 seemed to offer even better grounds for complacency. Lowering its estimates for eventual ozone loss to 2 to 4 percent, the study relied on questionable economic data and some new chemical considerations. Ignoring the fact that CFC production was already rising as the world recovered from a recession, the report assumed that CFC output would remain stable. Methane, increasing by 1 percent annually, would also slow ozone depletion. Increasing concentrations of carbon dioxide and nitrous oxide might also counteract some of the negative effects of CFCs (National Research Council 1984).
>
> "However, though total ozone loss was expected to be low, the report substantiated earlier forecasts that the vertical distribution of ozone would be greatly perturbed. According to Rowland, this is important because "looking at the total ozone loss minimizes the importance of the issue. No one has yet succeeded in developing a scenario in which the increase of CFC's doesn't decrease upper stratospheric ozone" (quoted in Roan 1989:111).
>
> "In addition, while superficially heartening on ozone depletion, the report contained some disturbing news regarding climate change, claiming that the atmospheric concentration of CFCs was growing ten times as fast as carbon dioxide, the chief greenhouse gas. This information was alarming; each CFC molecule was thought to contribute as much to greenhouse warming as fifteen thousand carbon dioxide molecules (Rowland 1987). Combined with other trace gases, primarily methane and nitrous oxide, CFCs could contribute as much to global warming as carbon dioxide would. Moreover, ozone depletion from CFCs is mitigated primarily by rising methane levels, which also increase the risk of global warming. Thus, the 1984 NAS report demonstrated the inseparability of ozone and climate issues, though this was not the message that reached policymakers and the public (Thomas 1986; Science 1984)." [Litfin, 1994, chapter 3, pp. 12-14 of 18]

d'ozone au-dessus de l'Antarctique, bientôt nommée trou de la couche d'ozone.[353] [Andersen & Sarma, 2002, pp. 51-66]

Contexte politique américain, et moment de la lente harmonisation internationale

Cette litanie de chiffres ne suffit pas à expliquer la baisse de mobilisation pour l'ozone aux Etats-Unis au début des années 1980. La sociologue Karen Litfin invoque le contexte politique qui y régnait entre 1981 et 1983. Au « soulagement réglementaire ('regulatory relief') », périphrase qui résume selon Litfin le mieux la nouvelle politique de l'environnement voulue par Ronald Reagan (1981-89), répondait une direction de l'EPA qui lui était complaisante, celle de Gorsuch Burford (1981-83). Lors d'une allocution au Sénat en 1981, cette dernière fit comprendre qu'elle ne prenait pas la menace de la destruction de l'ozone stratosphérique au sérieux. [Litfin, 1994, chapter 3, p. 13]

Néanmoins, dans le même temps, la Communauté économique européenne posait, à l'inverse, les premières pierres de sa gouvernance politique de l'ozone. Le Conseil des Ministres de la Communauté européenne vota en mars 1980 le gel de la capacité de production et la réduction de 30 pourcent de sa consommation de CFC dans les bombes aérosols par rapport aux niveaux de 1976 (*European Communities*, 1980), ceci pour l'ensemble des pays membres. De plus, lors d'une rencontre internationale à Oslo le mois suivant, des délégués de toutes les principales nations productrices de CFC se mirent d'accord pour réduire volontairement des émissions hors aérosols. [Litfin, 1994, chapter 3, p. 13][354]

Cette « harmonisation » des réglementations, principalement effectuée entre 1979 et 1981, fut suivie d'un lent processus de négociation des termes de la Convention internationale pour la protection de l'ozone, qui sera signée à Vienne en 1985 (voir sur ces points Andersen & Sarma, 2002, pp. 50-56). Par ailleurs, la recherche scientifique se poursuivait, avec la NASA et la NOAA comme chefs de file. A l'harmonisation des réglementations répondait une harmonisation internationale des savoirs sur l'ozone, avec le soutien de l'UNEP et de l'OMM. Certes, au début des années 1980, la protection de la couche d'ozone se trouvait au bas de l'agenda des gouvernements. Les pluies acides étaient plus médiatisées, et un nombre important de scientifiques se consacraient par ailleurs à la question émergente du changement climatique, sur laquelle l'OMM et l'UNEP étaient à présent également mobilisés (en 1979, fut lancé le Programme mondial de recherche sur le

[353] En 1985-86, les prédictions de destruction *globale* d'ozone étaient également reparties à la hausse (pourtant, les scientifiques n'avait pas encore intégré le phénomène de trou de la couche d'ozone antarctique dans leurs modèles). Lors de la huitième séance du CCOL à Nairobi (février 1986), « le rapport des USA montrait que les libérations de CFC-11 et CFC-12 aux taux de 1980 » induiraient une diminution de la colonne d'ozone de l'ordre de 4,9 à 7%. Publié l'année précédente, le grand rapport en 3 volumes *WMO/…*, 1985 avait pour sa part tablé sur une diminution de 5 à 9% (avec les mêmes taux de CFC-11 et CFC-12 de 1980). [Andersen & Sarma, 2002, pp. 51-66]

[354] Nous n'avons trouvé aucun travail spécifique d'historien sur les moteurs de l'action de la CEE pour la protection de l'ozone.

climat (WCRP) en collaboration avec l'ICSU, lors de la Première conférence mondiale sur le climat à Genève). Néanmoins, loin d'être démobilisée, la communauté des scientifiques de l'ozone s'étoffait et préparait un grand rapport international, qui paraitra en 1985 (*WMO/UNEP/…*, 1985). C'est ce que nous montrons dans les deux chapitres suivants, où nous mettons l'accent sur le travail de la NASA à partir de la fin des années 1970, et en particulier en quoi elle contribua, notamment sous l'impulsion de Robert Watson, à mettre en place une coopération internationale pour élaborer une expertise scientifique internationale sur l'ozone.

Un cadrage durable de la gouvernance des CFC

Dernier point. Si nous avons insisté ici sur le rôle des industriels aux Etats-Unis dans les années 1970, ce n'est pas seulement c'est parce qu'ils furent les principaux détracteurs de l'expertise scientifique de référence de l'EPA, mais également parce qu'ils contribuèrent grandement à cadrer les débats. Leur stratégie des années 1970 conditionnera de nombreux aspects de la gouvernance internationale de l'ozone qui verra le jour dans les années 1980. Nous en voyons au moins trois :

(i) Sous la pression des industriels (ainsi que, bien sûr, de politiques) proférant l'injonction de la compétitivité économique, la législation états-unienne de 1978 fut pensée dans *une optique internationale*, qui impliquait que d'autres Etats adoptent prochainement des réglementations du même type.

Dans un premier temps, il n'y eut pas d'effet d'entraînement. Les substituts hydrocarbonés furent utilisés aux Etats-Unis à partir de 1978, mais ne furent pas adoptés massivement à l'étranger avant l'entrée en vigueur du Protocole de Montréal (1987). En outre, affirme Karen Litfin, « le peu de [répondant] à l'étranger [avait été] l'une des raisons pour lesquelles les réductions proposées [en 1977] par l'EPA pour les utilisations *autres que les aérosols* (c'est nous qui soulignons) ne dépassèrent pas le stade de note au 'Federal Register' ». Au moment où la Communauté européenne poussera ses états membres à réglementer les CFC (au début des années 1980, puis au cours des négociations du Protocole de Montréal), leurs industriels adopteront des stratégies de pression semblables à celles des industriels états-uniens : décrédibilisation de l'expertise scientifique alarmiste, *et* argumentation économique dans un contexte de concurrence internationale (défendre la compétitivité économique nationale, et/ou prévenir les distorsions de concurrence).

(ii) Ceci ne signifie pas que l'industrie privée ne va pas exiger *une forme particulière d'expertise sur l'ozone*, après cette concession de 1978 faite à l'environnement. En particulier, elle va insister pour que l'expertise passe d'une *époque théorique* complexifiant les mécanismes de destruction d'ozone à une *époque empirique*, où

le primat serait accordé aux récits d'évolution de concentration d'ozone (corrélée aux émissions de CFC), sur la base de mesures de terrain.

Certes, l'amendement au 'Clean Air Act' de 1977 stipulait que « la preuve empirique de la destruction de l'ozone n'était pas requise pour activer une action réglementaire » ; et, affirme Karen Litfin, cette position fut maintenue par la suite par les Etats-Unis dans les négociations internationales. Toutefois, l'industrie continua à contester ce point, dans la lignée de ce qu'elle avait fait au milieu des années 1970, lorsqu'elle avait agité « des rapports [tendant à démontrer] que l'ozone avait augmenté dans l'Hémisphère nord au cours des années 1960 ».[355] Or, cette attitude n'était pas propre à l'industrie. Les scientifiques qui défendaient l'hypothèse de Molina et Rowland avaient parfaitement conscience du déficit de mesures au sol et depuis l'espace. Au cours des années 1980, l'accent sera mis sur la "sound science", en particulier le développement d'une plus grande interinstrumentalité et les analyses fouillées des mesures passées, en vue notamment d'élaborer des récits d'évolution des concentrations d'ozone sur la base de mesures continues (voir Chapitre 7).

(iii) Enfin, l'expertise internationale sur l'ozone, qui se mettra en place à partir de 1977, sera en fait *une expertise principalement états-unienne* (NASA, NOAA, EPA). Et, elle se construira en partie *dans le souci de contrer les objections scientifiques des industriels états-uniens et de stimuler leur développement de substituts*.

L'étouffement de la critique se fera, en partie, en intégrant ces derniers dans le processus d'expertise [Litfin, 1994, pp. 10-11 of chapter 3]. Mais, plus qu'une tentative d'étouffement de la critique, on peut y voir un processus de *négociation* avec l'industrie nationale *en amont de* la signature de textes internationaux contraignants pour l'industrie des CFC. En fait, si, entre 1986 et 1988, les industries états-uniennes changeront d'attitude pour accepter des règlementations (graduelles), ce n'est pas seulement (a) parce qu'elles prirent acte de l'inéluctabilité d'un abandon à terme de tout CFC au vu de la mobilisation médiatique et politique pour la sauvegarde de la couche d'ozone au milieu des années 1980. Mais aussi (b) parce que, incitées par les mouvements de consommateurs, leurs Etats nationaux ou par des agences fédérales telles que l'EPA, elles avaient entamé dès 1975 un processus de développement de substituts aux CFC, qui restait encore très embryonnaire dans l'industrie européenne. Enfin, à la toute fin des années 1970, des scientifiques de DuPont avaient intégré le champ d'expertise sur l'ozone (dominé par la NASA et la NOAA). Au cours des années 1980, le processus de développement de substituts aux CFC aux Etats-Unis serait

[355] Il leur fut objecté que :

> "First, many scientists attributed the increase in ozone to the ban on atmospheric testing of nuclear weapons early in the decade. Second, the increases might have been greater without CFCs during that period. Third, and most notably, industry's reasoning ignored the fact that the effects of CFCs are delayed because of their long atmospheric lifetimes. This point later became immaterial as satellite data indicated declining ozone levels in the 1970s and 1980s." [Litfin, 1994, p. 10]

favorisé par (c) le développement d'une recherche scientifique privée sur les impacts des CFC, qui irait plutôt dans le sens des experts internationaux, ainsi que par (d) le travail de coopération entre l'EPA et l'industrie, notamment autour de l'indice de gouvernement ODP ('Ozone Depletion Potential'). La principale figure de la recherche DuPont sur les impacts environnementaux des CFC s'appellera Mack McFarland ; il participait encore en 2010 à l'élaboration du dernier *WMO/UNEP/… Assessment of Ozone Depletion* en date. (Nous reviendrons plus en détail sur ces points relatifs à l'expertise "internationale" de l'ozone des années 1978-1992 dans notre Chapitre 7.)

Fluorocarbons and national economics

The Senate Committee on Aeronautics and Space Science last week concluded seven days of hearings on the aerosol and ozone controversy before its new ad-hoc sub-committee on the upper atmosphere. In addition to scientific testimony, the sub-committee heard from all the interested governmental agencies, and from the aerosol industry.

In evidence, Vincent J. Marriott, vice-president of the Continental Can Co., said that the controversy had already harmed the industry. Shipments of spray cans in the US were more than a quarter down in the first half of 1975, compared to the similar period in 1974. He attributed this to the controversy, although another industry source told *New Scientist* last week that he thought the US recession was still the major factor—as it was in the 6 per cent sales drop in aerosols during 1974. Latest industry figures, according to this source, showed that aerosol sales were now picking up and he believed that figures for August would show a drop of only one or two per cent over the figure for 12 months previous. He also confirmed that the decline in aerosol sales has been restricted largely to the United States.

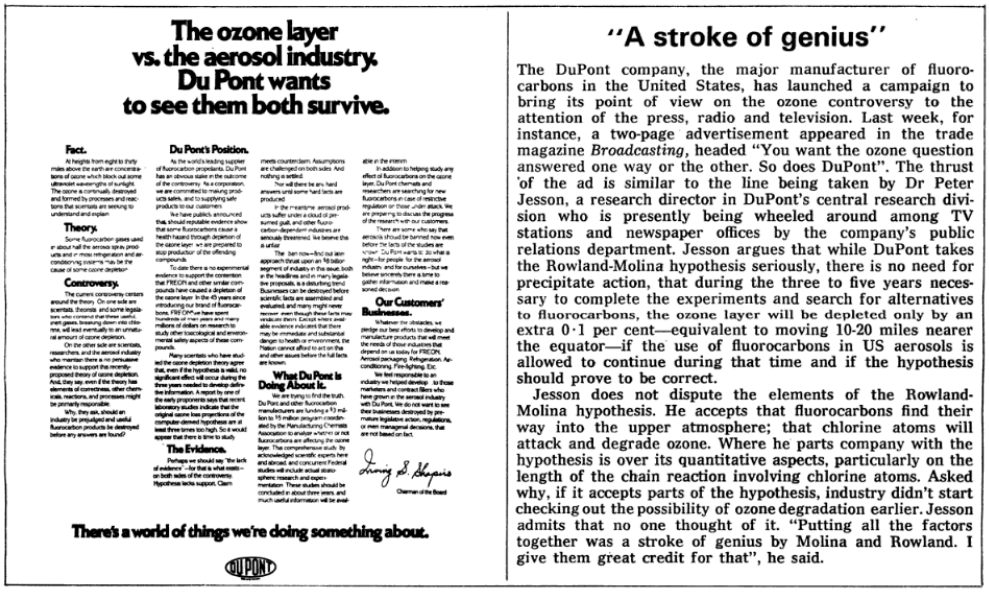
During 1974, sales of aerosols in the UK increased by about 14 per cent. That increase is not being sustained this year, but the industry believes that any fall-off in European aerosol sales is directly related to the economic situation, and that any "scare factor" is confined to America.

The controversy has already generated visible effects on American industry. One is the switch to alternative forms of packaging for aerosol products. According to a recent issue of the *New York Times*, the flow of changed packages was so great during August that an American newsletter which specialises in detailing new products gave up trying to list them.

Mechanical pumps boom

Manufacturers of mechanical pumps for sprays are reportedly working at full capacity, and television commercials in the US have begun to mention the absence of propellants from their products. One fragrance manufacturer, for instance, uses the line: "The natural, non-aerosol pump sprays are just pure fragrance—no propellant—so it lingers longer." Aerosols using propellants other than fluorocarbons are beginning to proclaim themselves (following Johnson's lead in its advertisements earlier this year—see p 18). Bio-D hair spray, for example, uses carbon dioxide as its propellant, and carries the tag "Biodegradable —contains no fluorocarbon gas".

Reprinted from The New York Times



The ozone layer vs. the aerosol industry. Du Pont wants to see them both survive.

Fact.

At heights from eight to thirty miles above the earth are concentrations of ozone which block out some ultraviolet wavelengths of sunlight. The ozone is continually destroyed and formed by processes and reactions that scientists are seeking to understand and explain.

Theory.

Some fluorocarbon gases used in about half the aerosol spray products and in most refrigeration and air-conditioning systems may be the cause of some ozone depletion.

Controversy.

The current controversy centers around the theory. On one side are scientists, theorists, and some legislators who contend that these useful, inert gases, lingering down into the stratosphere, will react eventually to an unnatural amount of ozone depletion.

On the other side are scientists, researchers, and the aerosol industry who maintain there is no persuasive evidence to support the recently-proposed theory of ozone depletion. And, they say, even if the theory has elements of correctness, other chemicals, reactions, and processes might be primarily responsible.

Why, they ask, should an industry be prejudged and useful fluorocarbon products be destroyed before any answers are found?

Du Pont's Position.

As the world's leading supplier of fluorocarbon propellants, Du Pont has an obvious stake in the outcome of the controversy. As a corporation, we are committed to making products safely, and to supplying safe products to our customers.

We have publicly announced that, should reputable evidence show that some fluorocarbons cause a health hazard through depletion of the ozone layer, we are prepared to stop production of the offending compounds.

To date there is no experimental evidence to support the contention that FREON and other similar compounds have caused a depletion of the ozone layer. In the 45 years since introducing our brand of fluorocarbons, FREON® we have spent hundreds of man years and many millions of dollars on research to study other toxicological and environmental safety aspects of these compounds.

Many scientists who have studied the ozone depletion theory agree that, even if the hypothesis is valid, no significant effect will occur during the three years needed to develop definitive information. A report by one of the early proponents says that recent laboratory studies indicate that the original ozone loss projections of the computer-derived hypothesis are at least three times too high. So it would appear that there is time to study.

The Evidence.

Perhaps we should say "the lack of evidence" — for that is what meets — on both sides of the controversy. Hypothesis lacks support. Claim meets counterclaim. Assumptions are challenged on both sides. And nothing is settled.

Nor will there be any hard answers until some hard facts are produced.

In the meantime aerosol products suffer under a cloud of presumed guilt, and other fluorocarbon-dependent industries are seriously threatened, like beleive this is unfair.

The ban now—first out-and-approach threat upon an $8 billion segment of industry in this issue, both in the headlines and in many legislative proposals, is a disturbing trend. Businesses can be destroyed before scientific facts are assembled and evaluated, and many might never recover even though these facts may vindicate them. Except where available evidence indicates that there may be immediate and substantial danger to health or environment, the Nation cannot afford to act on this and other issues before the full facts are known.

What Du Pont is Doing About It.

We are trying to find the truth. Du Pont and other fluorocarbon manufacturers are funding a $3 million to $5 million program coordinated by the Manufacturing Chemists Association to evaluate whether or not fluorocarbons are affecting the ozone layer. This comprehensive study, by acknowledged scientific experts here and abroad, and concurrent Federal studies will include actual stratospheric research and experimentation. These studies should be concluded in about three years, and much useful information will be available in the interim.

In addition to helping study any effect of fluorocarbons on the ozone layer, Du Pont chemists and researchers are searching for new fluorocarbons in case of restrictive regulation or those under attack. We are preparing to disclose the progress of the research with our customers.

There are some who say that aerosols should be banned now, even before the facts of the studies are known. Du Pont wants to do what is right—for people, for the aerosol industry, and for ourselves—but we believe sincerely there is time to gather information and make a reasoned decision.

Our Customers' Businesses.

Whatever the obstacles, we pledge our best efforts to develop and manufacture products that will meet the needs of those industries that depend on us today for FREON. Aerosol packaging. Refrigeration. Air-conditioning. Fire-fighting. Etc.

We feel responsible to an industry we helped develop — to those marketers and contract fillers who have grown in the aerosol industry with Du Pont. We do not want to see their businesses destroyed by premature legislative action, regulations, or even managerial decisions, that are not based on fact.

Irving S. Shapiro
Chairman of the Board

There's a world of things we're doing something about.

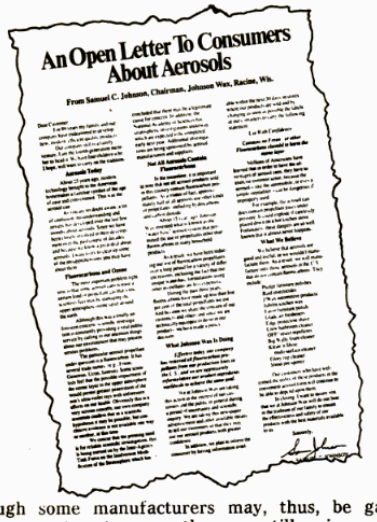
DUPONT

"A stroke of genius"

The DuPont company, the major manufacturer of fluorocarbons in the United States, has launched a campaign to bring its point of view on the ozone controversy to the attention of the press, radio and television. Last week, for instance, a two-page advertisement appeared in the trade magazine *Broadcasting*, headed "You want the ozone question answered one way or the other. So does DuPont". The thrust of the ad is similar to the line being taken by Dr Peter Jesson, a research director in DuPont's central research division who is presently being wheeled around among TV stations and newspaper offices by the company's public relations department. Jesson argues that while DuPont takes the Rowland-Molina hypothesis seriously, there is no need for precipitate action, that during the three to five years necessary to complete the experiments and search for alternatives to fluorocarbons, the ozone layer will be depleted only by an extra 0·1 per cent—equivalent to moving 10-20 miles nearer the equator—if the use of fluorocarbons in US aerosols is allowed to continue during that time and if the hypothesis should prove to be correct.

Jesson does not dispute the elements of the Rowland-Molina hypothesis. He accepts that fluorocarbons find their way into the upper atmosphere; that chlorine atoms will attack and degrade ozone. Where he parts company with the hypothesis is over its quantitative aspects, particularly on the length of the chain reaction involving chlorine atoms. Asked why, if it accepts parts of the hypothesis, industry didn't start checking out the possibility of ozone degradation earlier. Jesson admits that no one thought of it. "Putting all the factors together was a stroke of genius by Molina and Rowland. I give them great credit for that", he said.

FLUOROCARBON FILE


An Open Letter To Consumers About Aerosols

From Samuel C. Johnson, Chairman, Johnson Wax, Racine, Wis.

Reprinted from The New York Times

Although some manufacturers may, thus, be gaining from the present controversy, there are still serious worries about the economic effects of any legislation. As *New Scientist* reported earlier this year (17 July 1975), the Domestic and International Business Administration of the US Department of Commerce has calculated that a ban on the use of fluorocarbons from 1978 could cost billions of dollars and adversely affect the jobs of millions of workers. If there was a near-total ban on the use of fluorocarbons from 1 January 1978, then "more than 466 000 employees could be directly affected either by layoffs or curtailed employment" in the refrigeration industry alone. A partial ban would obviously be less costly, and is difficult to quantify—for example, it is not easy to calculate the effects on the can-producers because reduced demand for aerosol cans might be compensated for by increased demand for other types of can, to hold non-aerosol formulations of products previously sold as aerosols. However, according to the Department of Commerce analysis, "A ban on fluorocarbon propellants would undoubtedly adversely affect the industry, which is already faced with excessive manufacturing capacity."

Price increases

There would certainly be substantial effects on the manufacturers of fluorocarbons. Current sales value of these products in the US is close to $500 million, and, for the six US manufacturers, fluorocarbons account for between 1·4 and 36 per cent of their total corporate revenues. According to the Commerce analysis, "Existing US fluorocarbon manufacturing facilities represent a replacement cost of about $3000 million. These facilities have little value for use in production of other products." Consequently, if fluorocarbons were to be restricted to non-dispersive uses, this industry too would be faced with gross overcapacity, and the price of fluorocarbons would probably increase substantially.

Because of the economic effects, it seems likely that any legislative ban will phase out the use of fluorocarbons rather than taking immediate and total action against them. None of the US governmental agencies is planning any rush legislation and, at the recent Senate committee hearings, Harvard science policy expert Harvey Brooks presented impressive testimony on the drawback of hasty legislation. The agencies all seem to be awaiting the National Academy of Sciences report. due next April before deciding on any action. (Informed sources indicate that there will be nothing in this report to alter the "legitimate cause for concern" stance of the IMOS report published in June.)

Another reason why United States legislation is unlikely to be drastic is that European countries would probably not follow suit. The Americans have asked the European nations of the Organisation for Economic Cooperation and Development (OECD) to look into the problem. In addition, different European countries—notably Britain and Germany—are producing their own estimates of the fluorocarbon hazard. Public and official opinion in Europe, however, does not appear to rate the problem as highly as the Americans do, and it is difficult to find anyone on this side of the Atlantic who feels that a few years' delay before any restrictions are introduced would do serious damage.

Aerosols in the UK
(millions of cans filled)

1960	45	1965	128	1970	304
1961	50	1966	161	1971	349
1962	60	1967	177	1972	361
1963	70	1968	221	1973	438
1964	112	1969	253	1974	478

Is your aerosol really necessary?

"Aerosols are the ultimate in overpackaging. With all the problems we have, we have difficulty in seeing a rationale for aerosols. It's a product that's unnecessary," Barbara Hogan, of the American Center for Science in the Public Interest told a *Business Week* reporter earlier this year. It was not the first attack on the concept of the aerosol package.

In 1973, Friends of the Earth published *Packaging in Britain: a Policy for Containment*. Its authors, Walt Patterson and Graham Searle concluded that "For a few clearly identifiable applications, a case can be made for the use of aerosol containers. In general, however, it must be said that the dubious advantages conferred by aerosol packaging seem heavily outweighed by their considerable unit cost to the consumer in straightforward monetary terms—some 10p per aerosol container—to say nothing of the problems presented at the disposal stage, nor of the disproportionate resource-use involved in fabrication of such elaborate units for short-term usage."

Also on file . . .

Previous items in *New Scientist* on the aerosol and ozone controversy are:
"Aerosol hazard to atmospheric ozone", 25 September 1974, p. 781
"Freons in the stratosphere" (letter by Professor Richard Scorer), 10 October 1974, p. 140
"Aerosol sprays and the ozone shield", Professor Sherry Rowland, 5 December 1974, p. 717
"Everybody's finger on the button", 12 December 1974, p. 826
"Copernicus to monitor the Freon hazard", 10 April 1975, p. 61
"Hysteria ousts science from halocarbon controversy", 19 June 1975, p.643
"The danger of environmental jitters", Professor Richard Scorer, 26 June 1975, p. 702
"Fluorocarbon ban could cost US 'millions of jobs' ", 17 July 1975, p.160
"Are man-made halocarbons swamped by nature?" 24 July 1975, p.196
"MP calls for British fluorocarbon ban, 7 August 1975, p.336
"Spray can dangers" Gerald Wick, 7 August 1975, p.338.

Fluorocarbon file was compiled and edited by Martin Sherwood. Unsigned contributions are by Graham Chedd and/or Martin Sherwood.

Figure 31 : Article du *New Scientist*, publié le 2 octobre 1975
[*New Scientist*, 1975, pp. 17-18]

Chapitre 6. De l'affaire de l'ozone à la science holiste du système Terre

Dans notre Chapitre 4, nous avons montré que ce sont des chimistes de laboratoire ou des pollutions troposphériques, et non des aéronomes spécialistes de l'ozone stratosphérique, qui ont lancé des alertes à la destruction anthropique de l'ozone dans la première moitié des années 1970. Suite à ces alertes, quelques aéronomes déjà reconnus, dont certains ne sont autres que les auteurs des premières physico-chimies complexes de la stratosphère au cours des décennies 1950-60, vont rapidement prendre au sérieux les hypothèses de H. Johnston (1971), et de Molina-Rowland (1974). Marcel Nicolet se contente d'intégrer les composés azotés (NO_x) et les composés chlorés dans son bestiaire de composés chimiques entrant en jeu dans la chimie de l'ozone stratosphérique. Mais Paul Crutzen, par exemple, accorde un soutien prompt et plein de conviction à l'hypothèse catastrophiste des chimistes états-uniens. Il joue alors un rôle actif dans la constitution d'un programme de recherche, donc d'une communauté d'étude, sur le sujet.

De plus, de nouveaux arrivants dans le champ de l'aéronomie, qui travaillent pour la plupart à la NASA ou en proche collaboration avec elle, fournissent de nouvelles études de cas sur l'ozone. Dès 1972, Richard Stolarski et Ralph Cicerone (Université de Michigan) et Michael McElroy et Steven Wofsy (Université d'Harvard) ont pointé du doigt l'impact possible des émissions chlorées issues des navettes spatiales sur la couche d'ozone. Par la suite, aux côtés notamment de P. Crutzen, M. Molina, Robert Watson (NASA), Stolarski et Cicerone deviennent des coordinateurs centraux du programme de recherche sur la chimie stratosphérique, qui combina, à partir de la fin des années 1970 : études de cinétique chimique en laboratoire ; modélisation numérique ; mesures par ballons et avions par collecte d'échantillons ou télédétection ; observations satellitaires.

Les efforts conjoints du programme UARP ('Upper Atmospheric Research Program') de la NASA et du Laboratoire d'aéronomie de la NOAA forment la colonne vertébrale de ce programme. Comme l'a montré Erik Conway dans son *Histoire de la science atmosphérique à la NASA* (Conway, 2008), le rôle de la NASA est particulièrement décisif, en particulier à partir 1976, lorsque l'agence devient l'organe de recherche états-unien de référence sur l'ozone stratosphérique. A la NASA – comme dans le même temps à la NOAA, collaborent désormais des aéronomes, des chimistes de la troposphère et des scientifiques des atmosphères planétaires. Les derniers sont dans un premier temps les plus nombreux, du fait

de la vocation première de la NASA, la conquête spatiale. Mais, l'une des forces de la NASA proviendra de sa capacité à mobiliser des forces pluridisciplinaires et interinstrumentales [Conway, 2008, p. 195 & "Chapter 6. Atmospheric Chemistry", pp. 154-197].

Erik Conway a par ailleurs montré comment la NASA, qui a en son sein un personnel avec des compétences en aéronomie et bien sûr en planétologie comparée, sait les faire fructifier afin d'obtenir des financements, dans un contexte de coupes budgétaires dans les programmes spatiaux, mais où les thématiques du changement climatique, de la destruction de la couche d'ozone, voire des pollutions troposphériques à grande échelle ont le vent en poupe. De plus, la réorientation "environnementale" de la stratégie de recherche de la NASA ne se limite pas à l'étude des dérégulations de l'atmosphère à grande échelle. Au début des années 1980, un programme multidisciplinaire sur le Système Terre prend forme. Il enthousiasme aussi bien les théoriciens de la chimie stratosphérique que de la chimie troposphérique à grande échelle (M. McElroy, P. Crutzen, R. Watson, Robert McNeal) ; et également, des spécialistes du changement climatique (Ichtiaque Rasool, James Hansen, John Houghton, Veerabhadran Ramanathan), des océanographes (John Steele, James Baker), ou encore Lynn Margulis, une collaboratrice de J. Lovelock dans l'élaboration de l'hypothèse Gaia dans les années 1970. Après quelques retards à l'allumage, ce programme d'abord dit « programme sur l'habitabilité » verra le jour en 1990 sous le nom de 'Mission to Planet Earth'. Il s'agit là de l'un des premiers programmes d'étude dit "sur le système Terre" [*NASA*, 1982 ; Conway, 2008, chapters 8 & 9, pp. 243-311].

Ce Chapitre 6 forme le dernier volet de notre Partie B centrée sur les années 1970 et la première moitié des années 1980. Il se propose de suivre, à présent, des *aéronomes* et des *scientifiques des atmosphères planétaires* ayant contribué à la recherche sur la destruction anthropique de l'ozone. Dans un premier Sous-chapitre, nous montrons la prise de relai de certains de ces acteurs dans l'élaboration d'expertises sur la destruction anthropique de l'ozone. Nous introduisons les controverses sociotechniques sur les navettes spatiales états-uniennes et le Concorde européen, qui a amené quelques uns de ces acteurs à alimenter la littérature scientifique et experte sur la destruction de l'ozone. Nous montrons que les impacts environnementaux du Concorde constituèrent un maigre programme scientifique en Europe. La faible mobilisation autour des impacts environnementaux du Concorde, alliée au déficit de programme de mesures ambitieux sur la composition stratosphérique en Europe, explique sans doute en partie la chétive mobilisation contre les CFC ensuite (jusqu'aux négociations du Protocole de Montréal en 1985-87, ou tout le moins au début des années 1980), en France, au Royaume-Uni et en RFA. Le programme atmosphérique autour du Concorde n'en fut pas moins important pour la petite communauté d'aéronomes

européenne. Il fit venir à l'étude de la stratosphère des scientifiques qui n'y étaient nullement prédestinés – des physiciens voire des physiciens-ingénieurs de formation, dans leur immense majorité. Autre point important : ces études sur la stratosphère n'étaient plus systématiquement en lien avec des programmes militaires, comme cela avait été le cas dans les années 1950-60. Nous nous limiterons à l'exemple de la recherche française.

Notre Sous-chapitre 6.1 ne se résume toutefois pas à cet aspect. Nous identifions certains aéronomes et scientifiques des atmosphères planétaires (Paul Crutzen, Michael McElroy, Richard Stolarski, Ralph Cicerone), qui emboîtèrent rapidement le pas des chimistes H. Johnston, M. Molina et S. Rowland, et initièrent de la sorte une communauté de chercheurs de l'ozone d'origines disciplinaires plurielles. Et, nous montrons comment les trois alertes (sur les SST, les navettes spatiales et les CFC) se répondirent dans les publications pour prendre la forme d'une construction conjointe de confiance dans leurs hypothèses, mais également la forme de prolégomènes à une communauté transdisciplinaire de chimie de l'ozone – qui prend forme dès les années 1970 aux Etats-Unis, et en particulier au sein de la NASA, de la NOAA et du NCAR. Enfin, surtout, nous montrons comment l'arrivée les aéronomes dans la science de la destruction de la couche d'ozone scelle la création d'une discipline chimie de l'atmosphère (globale et non globale) à part entière (avec ses formations de deuxième cycle aux Etats-Unis, sa revue internationale en langue anglaise).

Dans un second Sous-chapitre, nous empruntons le chemin dans l'autre sens, pour montrer comment, alors que cette discipline se crée, elle s'hybride déjà avec d'autres. D'une part, avec les sciences des océans, des sols, du vivant, avec lesquelles elle travaille à l'élaboration de cycles biogéochimiques globaux. D'autre part, avec la climatologie, qui initie enfin un programme ambitieux sur le changement climatique d'origine anthropique, programme qui recouvre à la marge les études sur la chimie troposphérique et stratosphérique. Dans ce Sous-chapitre 6.2, nous nous focalisons, de nouveau, sur les études faites à la NASA.

6.1. La chimie stratosphérique devient un enjeu central pour les aéronomes et les scientifiques des atmosphères planétaires

Les scientifiques des atmosphères planétaires et le chlore des navettes spatiales

Les hypothèses des chimistes H. Harrison et H. Johnston sur la possible destruction de la couche d'ozone par la vapeur d'eau (Harrison, 1970) ou les oxydes d'azote (Johnston, 1971) émis par les SST amènent quelques aéronomes, géophysiciens et scientifiques des atmosphères planétaires à s'intéresser de plus près à l'ozone stratosphérique. En 1972, un nouveau composé chimique, le *chlore*, est désigné comme potentielle source anthropique de destruction d'ozone par des *scientifiques des atmosphères planétaires* : Richard Stolarski, Ralph Cicerone, Michael McElroy et Steven Wofsy. Les fusées de lancement des navettes spatiales émettent en effet du chlore.[356] Or, depuis plusieurs années, M. McElroy étudie le rôle de ce composé dans l'atmosphère de Vénus et, parallèlement, dans la stratosphère terrestre. De manière plus générale, au début des années 1970, l'idée que le chlore pourrait jouer un rôle dans la chimie de l'ozone stratosphérique « est 'dans l'air' », raconte H. Johnston. Ce qui explique que plusieurs groupes de chercheurs ait pu « découvrir son rôle de manière indépendante » [Johnston, 1992, p. 26].

Deux ans après la publication des travaux de R. Stolarski et R. Cicerone, d'une part, et de M. McElroy et S. Wofsy, d'autre part, l'opinion qui prévaut au sein de la communauté est que le risque de destruction de la couche d'ozone par une flotte de navettes spatiales est négligeable. Lors d'une rencontre organisée par la NASA à Coco Beach (Floride) les 21, 22 et 23 janvier 1974, les participants, parmi lesquels se trouve H. Johnston, concluent que « le chlore émis chaque année par 50 navettes spatiales est 300 fois moindre que la source naturelle d'oxydes d'azote stratosphériques, et que son effet sur l'ozone est probablement extrêmement faible ». Les deux chercheurs du 'Space Physics Research Laboratory' de l'Université du Michigan, R. Stolarski et R. Cicerone, qui ont quantifié les premiers ces émissions de chlore, se rangent à cet avis, comme en témoigne leur article "Stratospheric Chlorine: A Possible Sink for Ozone", envoyé au *Canadian Journal of Chemistry* le 18 janvier 1974. Les Etats-uniens y décrivent les navettes spatiales comme une source de

[356] Les navettes spatiales utilisent des fusées de lancement à propulsifs solides avec du perchlorate d'ammonium comme oxydant, et de l'aluminium en poudre et de l'asphalte comme carburant. Une fois dans la stratosphère, ces fusées libèrent divers produits gazeux, dont des oxydes d'aluminium et du chlorure d'hydrogène. Or, les radicaux hydroxyles présents dans la stratosphère peuvent réagir avec le chlorure d'hydrogène pour libérer du chlore à l'état d'atome, qui peut lui-même intervenir dans la chimie de l'ozone. [Johnston, 1992, p. 25]

chlore parmi d'autres, et s'attardent même plus longuement sur des sources de chlore autres que les navettes spatiales : les naturels embruns marins et éruptions volcaniques ; des composés chlorés industriels émis depuis le sol terrestre (d'après les travaux, non encore publiés, de Molina et Rowland)[357]. [Johnston, 1992, p. 26 ; Stolarski & Cicerone, 1974, pp. 1610 & 1614]

Initialement, racontera R. Stolarski, la couche d'ozone leur était apparue, à R. Cicerone et à lui, comme « un joli et paisible morceau de stratosphère à découper, afin d'en tirer un article ou deux tout en apprenant, et personne ne viendrait les déranger » ! Mais, l'hypothèse d'une perturbation de la couche d'ozone par le chlore ne manque pas de créer quelques remous dans l'arène scientifique et médiatique, un an seulement après le vote controversé du Congrès sur l'abandon du programme SST. Dès le mois de décembre 1972, raconte H. Johnston, il est « approché par un employé du gouvernement », qui lui propose de sonner l'alerte au sujet des navettes spatiales. Cet employé s'avère être un membre de la NASA. Il se peut qu'il s'agisse du même individu qui, dans les mois qui suivront, propagera l'idée d'un risque stratosphérique lié aux émissions chlorées des engins spatiaux, comme le suspecte H. Johnston. Quoiqu'il en soit, une chose est certaine : la NASA s'est emparée du sujet. [Johnston, 1992, pp. 25-26]

Immédiatement, l'agence fédérale cherche manifestement à calmer les ardeurs des lanceurs d'alerte.[358] Mais, dans le même temps, elle profite de cette nouvelle expertise sur

---

[357] Cet article, envoyé dans sa version définitive au *Canadian Journal of Chemistry* le 18 janvier 1974, est antérieur à Molina & Rowland, 1974, publié le 28 juin 1974. Stolarski et Cicerone n'y évoquent pas explicitement les CFC. Par contre, Stolarski et Rowland précisent que « le rôle des oxydes de chlore dans la stratosphère a également été discuté par Molina et Rowland, dans un article soumis à *Nature* », qui ne peut être autre que Molina & Rowland, 1974, dont la première version sera reçue par la rédaction de *Nature* le 21 janvier, alors que le couple Molina-Rowland n'avait jusqu'alors jamais soumis aucun article à *Nature*. [Stolarski & Rowland, 1974, p. 1615 ; Molina & Rowland, 1974, p. 812]

[358] Evoquant « deux sources » orales, H. Johnston fait même état de "pressions" qu'auraient subies des chercheurs du 'Lockheed Research Laboratory' de Palo Alto (Hiro Hoshizaki et Larry Anderson) de la part de la NASA. La théorie du Lockheed sur la destruction de l'ozone par les chlores des navettes spatiales fut finalement publiée uniquement dans des rapports internes au Lockheed, affirme le chimiste. [Johnston, 1992, pp. 25-26]

Plus généralement, les travaux sur l'action délétère des chlores sur l'ozone ne manquèrent pas de susciter une nouvelle polémique, un an seulement après celle sur le NO_x, initiée par Johnston. Nous n'avons pas cherché à l'étudier en détail. Son intensité fut insignifiante, en comparaison avec les controverses sur les SST et les CFC. Elle demeura presque exclusivement circonscrite à la communauté scientifique. L'hypothèse n'a jamais été totalement infirmée, mais le faible trafic de navettes spatiales n'a de toute façon jamais laissé planer la menace d'impacts importants, ni permis aux travaux sur les pollutions des vols spatiaux de s'imposer comme un sujet de recherche majeur. Peu d'études seront ainsi menées sur les impacts des vols de fusées sur l'ozone dans les années 1970-80 (*cf.* Tyrell *et al.*, 1999), et la thématique reflua à la fin des années 1970, en même temps que celle des impacts des avions stratosphériques, au profit des CFC. Selon les scientifiques, comme pour les avions supersoniques, le *faible trafic* des fusées et navettes ne saurait occasionner une modification sensible de la couche d'ozone.

Au cours des décennies suivantes, seuls les experts des agences spécialisées dans le trafic aérien et aérospatial ont continué, "paisiblement", le travail de veille. Et, c'est précisément grâce à ce travail que l'hypothèse d'une contribution des vols de fusées à la destruction de l'ozone fera de nouveau son apparition dans la deuxième moitié des années 1990. Elle sera mentionnée dans les rapports d'experts internationaux sur l'ozone de la WMO/UNEP, suite notamment à un rapport d'expertise de l'agence publique fédérale états-unienne 'Aerospace Corporation' (Zittel P.R., 1994, "Computer Model Predictions of the Local Effects of Large Solid-Fuel Rocket Motors on Stratospheric Ozone", Aerospace Corporation Report No. TR-94(4231)-9, Sept. 1994). Nulle "alerte", toutefois, et nulle

l'ozone stratosphérique pour se positionner en spécialiste de la question. Déjà impliquée dans le CIAP dès son lancement en 1971, la NASA s'implique d'avantage dans la science de l'ozone à la faveur de cette nouvelle alerte, dont elle peut devenir la première victime. Le 3 juin 1973, l'agence spatiale délivre un rapport interne de quatre-vingts pages intitulé "Assessment of possible environmental effects of space shuttle operations" (NASA Contractor Report-129003)[359], avant d'organiser la rencontre de Coco Beach en janvier 1974. 'In fine', l'affaire des chlores des navettes spatiales participe au renforcement du programme de recherche sur l'ozone stratosphérique à la NASA, effort qui permettra, nous le verrons, de devenir le principal relai du CIAP en 1976 (voir première Section du Sous-Chapitre 6.2 sur « le tournant environnemental de la NASA »). [Stolarski, 1977 **in** Dotto & Schiff, 1977, p. 125 ; Johnston, 1992, pp. 25-26]

La solidarité entre lanceurs d'alerte

Dès 1974 aux Etats-Unis, les trois théories de la destruction anthropique de l'ozone stratosphérique – SST, navette spatiale et CFC – sont tour à tour traitées indépendamment, ou comme une seule et même problématique. Ces associations ne sont pas propres à un camp. Ainsi, les détracteurs attaquent avidement la théorie des CFC sur la base de sa ressemblance avec la théorie de la destruction de l'ozone par les SST ; et pour cause, dès le milieu des années 1970, la dangerosité des SST ne fait plus l'unanimité au sein de la communauté scientifique. En retour, les scientifiques qui défendent leur alerte utilisent avidement les autres hypothèses de destruction de l'ozone pour renforcer la leur.

Dans leur article de juin 1974, Molina et Rowland, qui suspectent les CFC de l'industrie chimique de libérer du chlore, citent les travaux de Stolarski et Cicerone.[360] En retour, Stolarski et Cicerone soutiennent dès septembre 1974 la thèse des deux chimistes dans un article publié dans *Science*, intitulé « Stratospheric Ozone Destruction by Man-Made Chlorofluoromethanes » (avec Stacy Walters). Déjà préoccupés par l'action des chlores émis

réglementation, depuis. Dernier point : on a reparlé, plus récemment, des impacts environnementaux des vols spatiaux avec les débuts du tourisme spatial.

[359] Cicerone et Stolarski figurent au rang des signataires du rapport. A la faveur de leurs travaux sur le chlore des navettes spatiales, les deux chercheurs du 'Space Physics Research Laboratory' de l'Université du Michigan se sont rapprochés de la NASA. En 1972-73, Stolarski est déjà 'Visiting Scientist' au 'Johnson Space Center' de la NASA. Dès 1974, il intègre la NASA, institution qu'il ne quittera plus, et qui lui permettra de demeurer l'une des figures majeures de la science de l'ozone jusqu'à nos jours (il participera à la rédaction de tous les grands rapports d'experts internationaux). Au sein de la NASA, il déménagera en 1976 du 'Johnson Space Center' pour intégrer définitivement le 'Goddard Space Flight Center' (1976-… ; émérite au sein de l'"Atmospheric Chemistry and Dynamics Branch', à partir de 2010). A la fin des années 1970, le 'Goddard Space Flight Center', et plus généralement la NASA, ont attiré de nombreux chercheurs souhaitant travailler sur la destruction de l'ozone stratosphérique. [CV de Richard Stolarski, http://acd-ext.gsfc.nasa.gov/People/Stolarski/resume.html (02/10/2012)]

[360] La publication Stolarski R. S. & Cicerone R. J., 1974 étant en cours de publication au moment de l'envoi de leur version définitive de l'article à *Nature*, le 21 mars 1974, Molina et Rowland citent « Stolarski R.S. and Cicerone R.J., International Association of Geomagnetism and Aeronomy (Kyoto, Japan, 1973) ; see also *Can. J. Chem.* (in the press) ». [Molina & Rowland, 1974, p. 812]

par les navettes spatiales, les deux chercheurs en Physique spatiale croient en la possibilité qu'a l'industrie des CFC, source de chlore stratosphérique beaucoup plus importante que la leur, « d'affecter fortement les concentrations d'ozone stratosphérique dans les décennies à venir ». [Molina & Rowland, 1974, p. 812 ; Cicerone, Stolarski & Walters, 1974, p. 1165]

Quant à "l'article originel" sur la destruction anthropique de la couche d'ozone, Johnston, 1971, bien que portant sur les oxydes d'azote et non les chlores, il est inévitablement cité par les protagonistes des nouvelles alertes. Ajoutons toutefois que, en retour, H. Johnston répète invariablement que tout le mérite revient à M. Nicolet et P. Crutzen, pour avoir désigné « indépendamment » (en 1971) « la source d'oxydes d'azote stratosphériques comme étant le fruit de la réaction des oxydes nitreux (N_2O) avec un atome d'oxygène porteur d'un singulet ». Et, affirme le chimiste américain, il a « toujours regardé Crutzen comme le codécouvreur [avec lui] du problème SST/NO_x/O_3. » [Andersen & Sarma, 2002, pp. 7-8 ; Christie, 2000, p. 36 ; Rowland & Molina, 1974, p. 812 ; Cicerone, Stolarski & Walters, 1974, pp. 1165-1167 ; Johnston, 1992, pp. 4 & 21]

L'association des problématiques fait sens *épistémologiquement* aux yeux des scientifiques, puisqu'elle est inscrite au cœur même de leur raisonnement réductionniste (et, les modèles numériques qu'ils utilisent sont parfois très semblables). Les composés chlorés des navettes spatiales agissent selon eux sur l'ozone d'une manière semblable aux NO_x des SST. Et, les composés chlorés des CFC se comportent d'une manière analogue aux composés chlorés des navettes spatiales, donc également aux NO_x des SST.[361] Mais, le soutien réciproque qui naît entre les protagonistes des différentes alertes possède également une vertu *rhétorique* évidente : il s'agit de faire front contre ceux qui condamnent l'idée de destruction anthropique de la couche comme une pure fantaisie. Pour ces deux raisons, des liens collégiaux se tissent entre chimistes de l'atmosphère et physiciens de l'atmosphère globale, au cœur de la tempête politique des années 1970 aux Etats-Unis. Et, en définitive, *la communauté de recherche pluridisciplinaire sur la destruction de l'ozone stratosphérique, et donc sur la chimie atmosphérique globale, est fille de la triple controverse sociotechnique* que nous avons décrite, et du jeu d'alliance qui se tisse alors entre lanceurs et relayeurs des alertes.

[361] Outre ces analogies entre processus, les scientifiques commenceront à étudier les effets couplés de ces différentes perturbations à partir de la fin des années 1970 (Liu *et al.* (1976), Luther & Duewer (1978), Logan *et al.* (1978), Luther *et al.* (1979)). Au Lawrence Livermore National Laboratory (LLNL), Donald J. Wuebbles, F. M. Luther et leurs collègues peuvent compter sur un arsenal informatique puissant pour réaliser de tels couplages. Dans leur étude "Effects of coupled Anthropogenic perturbations on Stratospheric Ozone", publiée en 1983 dans *Journal of Geophysical Research*, ils utilisent un modèle de chimie transport unidimensionnel, qui prend en compte une projection future pour trois types d'émissions d'avions (N_2O, CO_2 et NO_x), ainsi que deux types de scénarios d'émission de chlorocarbones. Ils y adjoignent également les projections, laissées constantes pour les simulations, de deux autres espèces participant à la chimie de l'ozone stratosphérique : le monoxyde de carbone CO et le méthane CH_4. [Wuebbles *et al.*, 1983, pp. 1444-1445]

Cette alliance est particulièrement resserrée au cours des années 1974-76 de forte controverse. Dans leur article de septembre 1974, Cicerone, Stolarski et Walters publient des résultats de modélisations informatiques réalisées sur la simple base du modèle chimique de Rowland et Molina (ils annoncent une baisse de 10% de l'ozone d'ici à 1985 ou 1990). Les chercheurs de l'Université du Michigan ne se contentent pas de citer l'article des deux chimistes dans *Nature*, mais également une « communication personnelle de F. Rowland ». Ils citent par ailleurs un article de McElroy et Wofsy, publié dans le *Journal of Atmospheric Sciences* au début de l'année 1974. Les deux physiciens (accompagnés de J. Penner et J. McConnell) y confirmaient que « les avions stratosphériques […] représentaient un risque environnemental potentiellement important » Dernier exemple : c'est H. Johnston qui communique, dans les *Proceedings of the US NAS*, l'article de son collègue-expert du CIAP, l'aéronome Donald Hunten (Kitt Peak National Observatory), intitulé "Estimates of stratospheric pollution by an analytic model (eddy diffusion/NO_x/supersonic transport)" (1975).

La liste des membres du panel d'experts CIAP de la NAS est un excellent révélateur de la rencontre de chercheurs issus de plusieurs origines disciplinaires, autour de l'expertise de la destruction de l'ozone, au cours des années 1970. Le CIAP réunit en effet des chercheurs qui, quelques années auparavant étaient *chimistes des pollutions troposphériques* (H. Johnston), *chimistes de laboratoire* (S. Rowland, R. Watson), *scientifiques des atmosphères planétaires* (M. McElroy, R. Stolarski, R. Cicerone). Cette rencontre marque la naissance d'une communauté de chimistes de l'ozone, et plus généralement de chimie de l'atmosphère globale. Outre ces « outsiders », la dernière figure représentée est celle de *l'aéronome* spécialisé dans la chimie des moyenne et haute atmosphères, c'est-à-dire celle du spécialiste traditionnel de la chimie stratosphérique. On en trouve quelques représentants au sein du CIAP. Parmi eux, Paul Crutzen. Dans la section suivante, nous mettons en relief le rôle spécifique qu'il joua dans la création, non seulement d'un champ d'étude sur les effets de la réactivité chimique sur la composition de l'atmosphère à l'échelle globale, mais également sur la formation d'une discipline académique nommée "Chimie atmosphérique". Discipline qui doit, en définitive, énormément à l'affaire de l'ozone dans les années 1970-80 (comme nous l'avions déjà annoncé dans la Conclusion de la Partie A). [*Science News* (1), 1974, pp. 212-213 ; Cicerone, Stolarski, Walters, 1974, pp. 185-186 ; McElroy *et al.* **in** *Science News* (2), 1974, p. 160 ; Hunten, 1975, p. 4711]

Le rôle proactif de l'aéronome Paul Crutzen dans la création d'une discipline scientifique nommée Chimie atmosphérique

Ingénieur de formation mais rapidement « désireux de faire une carrière universitaire », comme il l'affirmera dans son allocution du Prix Nobel de Chimie 1995, Paul Crutzen embrasse une carrière de scientifique de l'atmosphère en répondant en 1959 à une annonce du Département de Météorologie de Stockholm Högskola (à partir de 1961, Université de Stockholm) en quête d'un programmateur informatique. A la fin des années 1960, on retrouve le Néerlandais focalisé vers un « but final », qui est « d'obtenir une équation [, ou plutôt une série d'équations,] qui donnerait les changements de concentration en ozone sur 24 heures », comme il le formule dans son article de 1969 intitulé "Determination of parameters appearing in the "dry" and the "wet" photochemical theories for ozone in the stratosphere" [Crutzen, 1969, p. 368]. Bien qu'il ait été embauché à l'Université de Stockholm comme programmateur informatique, Crutzen ne cherche en effet pas tant à développer des modèles numériques qu'à se faire un nom comme théoricien dans l'aéronomie.[362] En 1995, il déclarera avoir embrassé cette spécialité de l'aéronomie chimique en partie par défaut. Une fois intégré l'université, l'informaticien avait pu assister à des cours et conférences, et cheminer vers « une carrière universitaire ». Toutefois, son travail de programmateur ne lui avait pas offert le loisir de « prendre part à des exercices de laboratoires consommateurs de temps », et donc de suivre les cursus complets de physique ou de chimie. *Par conséquent,* « je devins un pur théoricien », expliquera Crutzen. Mais, en vérité, il affirme, ailleurs, que son choix de « faire de la science pure » s'était également fait par goût et esprit de liberté. [Crutzen, 1995][363]

---

[362] L'article de 1969, qui « examine la possibilité d'expliquer les observations d'ozone entre 30 et 35 km avec la théorie de Hampson », frappe par l'étourdissante quantité d'équations-bilans prises en compte dans le raisonnement de Crutzen [Crutzen, 1969, p. 368]. La confection de listes de réactions chimiques, suivie de considérations sur les vitesses de réaction et la pertinence à accorder un poids plus ou moins grand à telle ou telle réaction pour la stratosphère, ressemblent au travail préparatoire d'un programmateur de modèle numérique de chimie atmosphérique, qui cherche à simplifier son modèle (pour réduire ses temps de calcul, ou éviter des comportements chaotiques). Pourtant, bien que pouvant servir à des modélisations numériques, les considérations exposées dans l'article de Crutzen relève en fait explicitement d'un travail d'analyse d'un théoricien de la chimie de la moyenne atmosphère. Dans l'article de 1970, rédigé par Crutzen dans le cadre d'un contrat post-doctoral à l'"European Space Research Organization', le schème théorique exposé est encore plus foisonnant que l'année précédente. En prenant à présent en compte les composés azotés, le schème de Crutzen est passé de dix-huit à vingt-trois réactions chimiques. Dans les décennies suivantes, le chercheur néerlandais se plaira à imaginer encore et toujours de nouveaux systèmes d'équations chimiques complexes – que les capacités croissantes des ordinateurs rendront de plus en plus "calculables". [Crutzen, 1969 ; Crutzen, 1970]

[363] Paul Crutzen (1933-…) s'impose comme nouveau visage dans le milieu très restreint des théoriciens de l'ozone stratosphérique à la fin des années 1960. Nous reviendrons à de nombreuses reprises sur ses travaux, tant il devint *le* chimiste de l'atmosphère globale "aux mille tours", allant toujours vers de nouvelles thématiques "d'avant-garde". Il devint également l'un des plus influents scientifiques de l'atmosphère globale, en particulier après qu'on lui eut attribué le Prix Nobel de Chimie (en 1995, pour ses travaux sur l'action des NO_x sur l'ozone stratosphérique autour de 1970 ; Nobel partagé avec Rowland et Molina).

De nationalité néerlandaise, cet ingénieur (civil) de formation (il travaille pour le Bureau de Construction des Ponts de la ville d'Amsterdam entre 1954 et 1958) s'installe près de Stockholm en Suède en 1958, où il a trouvé un

Si, au milieu des années 1960, la science de l'ozone stratosphérique apparaît comme « pure » aux yeux de Crutzen, ce n'est pas uniquement parce qu'il en choisit sa partie la plus « fondamentale » (la théorie), mais également parce qu'elle concerne alors exclusivement des « processus naturels ». Or, ceci l'oppose précisément aux études que mènent alors la plupart de ses collègues de l'Institut météorologique de l'Université de Stockholm (MISU), dont Bert Bolin, Henning Rodhe ou Erik Eriksson. A partir de la fin des années 1950, ceux-ci ont en effet travaillé sur les effets du CO_2 anthropique et sur l'acidification des précipitations (voir Sous-chapitre 3.2). A l'inverse, Crutzen n'est alors nullement en quête d'un travail d'alerte ou de veille environnementale, et cherche même plutôt à le fuir. Il déclarera avoir choisi l'aéronomie, car il y reconnaissait « un sujet de recherche qui le laissait totalement libre », à l'écart de l'agitation politique qui entourait déjà les sciences de l'atmosphère en Suède dans les années 1960. La quiétude du champ allait toutefois être de courte durée, et son programme de recherche allait bientôt rejoindre le programme de protection environnementale de ses collègues de Stockholm.

En 1968, Paul Crutzen obtient un Doctorat ('Licentiat') en 'Météorologie' à l'Université de Stockholm. En 1969-1970, il acquiert ses premiers titres de noblesse au sein de la communauté des aéronomes, à la faveur de la publication de schèmes raffinés de chimie de l'ozone dans la moyenne atmosphère.[364] Lorsque le Comité Nobel attribuera à Crutzen son prestigieux prix, ce sera pour son article *théorique* de 1970, qui montre le rôle possible des

travail dans un bureau de construction immobilière (son épouse est finlandaise). « Désireux de faire une carrière universitaire », Paul Crutzen raconte, dans son allocution d'obtention du prix Nobel de Chimie 1995, qu'il avait alors répondu à une annonce du Département de Météorologie de Stockholm Högskola (à partir de 1961, Université de Stockholm), parue dans un journal suédois, recherchant un programmateur informatique. « Bien que ne possédant pas la moindre expérience dans le domaine », il est embauché à compter du 1er juillet 1959. Un an plus tôt, Dr Bert Bolin avait succédé au défunt Prof. Gustav Rossby, à la tête des Meteorology Institute of Stockholm University (MISU) et de l'International Meteorological Institute (IMI) qui lui été associé. Crutzen se retrouve alors au cœur d'un groupe de chercheurs qu'il présentera à juste titre comme « à la pointe de la recherche météorologique ». De plus, à en croire Crutzen, « à cette époque, l'Université de Stockholm abritait les ordinateurs les plus rapides au monde (BESK et son successeur FACIT). » Paul Crutzen fut dans un premier temps embauché exclusivement pour élaborer les algorithmes des modèles numériques de météorologie.

Parallèlement, Crutzen eut bien sûr accès à toute une littérature et des conférences sur l'atmosphère, et parvint à embrasser une carrière universitaire dans les sciences de l'atmosphère, et en particulier comme théoricien de l'ozone stratosphérique, comme il le racontait, toujours dans son discours du Nobel, en 1995 :

> "The great advantage of being at a university department [(in Stockholm)] was that I got the opportunity to follow some of the lecture courses that were offered at the university. By 1963 I could thus fulfill the requirement for the 'filosofie kandidat' (corresponding to a Master of Science) degree, combining the subjects mathematics, mathematical statistics, and meteorology. Unfortunately, I could include neither physics nor chemistry in my formal education, because this would have required my participation in time consuming laboratory exercises. In this way I became a pure theoretician. I have, however, always felt close to experimental work, which I have strongly supported during my later years as director of research at the National Center of Atmospheric Research (NCAR) in Boulder, Colorado (1977-1980) and at the Max-Planck-Institute for Chemistry in Mainz, Germany (since 1980). [Crutzen, 1995, pp. 191-192]

[364] Crutzen, P. J., 1969: "Determination of parameters appearing in the "dry" and the "wet" photochemical theories for ozone in the stratos". Tellus, **21**, 368-388 ; Crutzen, P. J., 1969: "Determination of parameters appearing in the oxygen-hydrogen atmosphere". Ann. Géophys., **25**, 275-279 ; Crutzen, P. J., 1970: "The influence of nitrogen oxides on the atmospheric ozone content". Q. J. R. Meteorol. Soc., **96**, 320-325. En 1965, il avait déjà co-signé avec J.R. Blankenship, "A photochemical model for the space-time variations of the oxygen allotropes in the 20 to 100 km layer" (Tellus, 18, 160-175).

NO_x dans la chimie de l'ozone. Les émissions de NO_x dont parlait Crutzen dans son article sont dites « issues de l'activité microbiologique dans les sols », sans que le chercheur ne les relie à quelque activité anthropique (des activités agricoles, par exemple)[365]. De plus et surtout, Crutzen ne fait pas l'hypothèse d'une destruction d'ozone, mais pointe simplement du doigt le potentiel des NO_x à participer à une chimie de l'ozone stratosphérique conçue comme "en équilibre" (c'est-à-dire avec une constante destruction et régénération de l'ozone qui le maintient à de mêmes niveaux de concentration moyens) [Crutzen, 1970, p. 320].

En revanche, lorsque le Néerlandais eut en main, à l'automne 1970, le rapport SCEP ('Study on Critical Environmental Problems') publié par le MIT, la partie sur les impacts potentiels de l'introduction de grandes flottes stratosphériques d'avions supersoniques lui aurait fait « réaliser immédiatement que nous pourrions faire face à un problème environnemental global sérieux », racontera-t-il dans son discours du Nobel [Crutzen, 1995].[366] Et, après la publication de Johnston (1971), qui cite son article de l'année précédente sur le rôle des NO_x dans la chimie de l'ozone, Crutzen sera l'un des premiers chercheurs-aéronomes à soutenir l'hypothèse du chimiste hors des Etats-Unis. Johnston, puis plus tard Molina et Rowland (1974), citaient les travaux de Crutzen (en particulier, Crutzen, 1970) ; en retour, ce dernier leur apporta un soutien précoce. Certes, Crutzen croyait en son schème réactif et ses constantes de réaction, et voyait de plus d'un bon œil pour son programme de recherche la venue de nouvelles problématiques, aptes de surcroît à interpeler les financeurs publiques. Toutefois, il est peu probable que le chercheur fût touché *subitement* par les problèmes environnementaux au moment où on lui soumit l'hypothèse de la destruction de l'ozone par les SST, comme il le laisse entendre dans son discours de 1995. Avait-il pu être

---

[365] D'après Crutzen, l'hypothèse d'un lien entre activités agricoles, et activités microbiologiques des sols productrices de NO_x, n'avait même jamais encore été formulée en 1971 :

> "N_2O is a natural product of microbiological processes in soils and waters. A number of anthropogenic activities, such as the application of nitrogen fertilizers in agriculture, also lead to significant N_2O emissions. The rate of increase in atmospheric N_2O concentrations for the past decades has been about 0.3% per year. That, however, was not known in 1971."

Crutzen ajoute que sa découverte de la corrélation entre production biologique des NO_x et chimie de la couche d'ozone contribua fortement à amener les biologistes et les scientifiques de l'atmosphère à travailler ensemble :

> "The discovery of the indirect role of a primarily biospheric product on the chemistry of the ozone layer has greatly stimulated interest in bringing biologists and atmospheric scientists together. Other examples of such biosphere-stratosphere interactions are CH_4 and OCS." [Crutzen, 1975, p. 196]

(Voir, sur le sujet, notre section « les cycles biogéochimiques » dans le Sous-chapitre 6.2.)

[366] Crutzen, 1995 :

> "In the fall of 1970, still in Oxford, I obtained a preprint of a MIT sponsored Study on Critical Environmental Problems (SCEP) which was held in July of that year (22). This report also considered the potential impact of the introduction of large stratospheric fleets of supersonic aircraft (U.S.: Boeing; Britain/France: Concorde; Soviet Union: Tupolev) and gave me the first quantitative information on the stratospheric inputs of NOx which would result from these operations. By comparing these with the production of NOx by reaction R13, I realized immediately that we could be faced with a severe global environmental problem. Although the paper in which I pro- posed the important catalytic role of NOx on ozone destruction had already been published in April, 1970, clearly the participants in the study conference had not taken any note of it, since they concluded "The direct role of CO, CO_2, NO, NO_2, SO_2, and hydrocarbons in altering the heat budget is small. It is also unlikely that their involvement in ozone photochemistry is as significant as water vapour". I was quite upset by that statement. Somewhere in the margin of this text I wrote "Idiots".
>
> After it became quite clear to me that I had stumbled on a hot topic, I decided to extend my 1970 study by treating in much more detail the chemistry of the oxides of nitrogen (NO, NO_2, NO_3, N_2O_4, N_2O_5), hydrogen (OH, HO_2), and HNO_3, partially building on a literature review by Nicolet (23). I soon got into big difficulties." [Crutzen, 1995, p. 196]

tout à fait insensible aux discours alarmistes sur l'environnement qui étaient assénés depuis quelques années, certains par ses propres collègues de l'Université de Stockholm ?

Nous présumons que le milieu de scientifiques dans lequel évoluait Crutzen à Stockholm, dans un pays à la pointe des problématiques environnementales, marqua le Néerlandais. Il favorisa sa croyance dans la possibilité d'occurrence de réactions chimiques atmosphériques aux effets spectaculaires (*cf.* les smog), de transports de composés chimiques sur de longues distances (*cf.* les pluies acides), de déséquilibres atmosphériques à l'échelle globale (*cf.* le changement climatique), ainsi que par ailleurs dans l'opportunité de mobiliser les décideurs politiques sur ces questions. Bien que « voulant faire de la science pure liée aux processus naturels », Crutzen se laissa facilement entrainer en 1970 par un mouvement initié en partie par ses propres collègues de Stockholm, Bert Bolin et Henning Rodhe notamment, qui avaient contribué à lier le destin des sciences de l'atmosphère à l'expertise scientifique sur les risques de changement climatique et de pluies acides.[367] [Crutzen, 1995]

Fruit ou non d'une "révélation", le "goût" de Crutzen pour les problématiques environnementales va s'affirmer avec force à partir de 1970. Dès 1972, soit un an seulement après la parution de l'article de H. Johnston, Crutzen publie dans *AMBIO* un article dont le titre, "SST's – a threat to the earth's ozone shield", ne laisse guère planer de doute sur sa conviction. Il y écrit « qu'il existe une possibilité réelle d'atteinte sérieuse au bouclier d'ozone, par l'action catalytique des oxydes d'azote issus des gaz d'échappement des avions supersoniques. » Autre facteur révélateur de l'attitude de Paul Crutzen, il pense déjà à la possibilité « d'un accord international pour des limitations du nombre total de vols supersoniques dans le monde », « si les émissions d'oxydes d'azote des SST ne peuvent pas être fortement réduites » par le biais d'une innovation technologique. [Crutzen, 1972]

De surcroît, Crutzen publie cet article, ainsi que d'autres articles alarmistes sur la destruction anthropique de la couche d'ozone, dans le journal *AMBIO*. Or, si *AMBIO* est un journal avec comité de lecture par les pairs, ses éditeurs ont cherché de manière patente à jouer au cours des décennies 1970-80 un rôle de relai des études sur les risques globaux –

[367] Dans le Chapitre 3, nous avons déjà évoqué les travaux du météorologiste Bert Bolin, qui a succédé en 1957 à Carl-Gustav Rossby comme directeur du l'"International Meteorological Institute' de Stockholm. A la fin des années 1950, Bolin étudie les circulations atmosphériques et océaniques, ainsi que les échanges de CO_2 entre atmosphère et océan (Bolin, 1960, "On the exchange of carbon dioxide between the atmosphere and the sea", *Tellus*, *12*; Bolin & Eriksson, 1958, "Changes in the Carbon Dioxide Content of the Atmosphere and Sea due to Fossil Fuel Combustion"). Entre 1963 et 1968, il cosigne trois articles avec Charles David Keeling, qui feront date. En 1970, il publie un nouvel article dans *Tellus*, intitulé "Variations of the carbon dioxide content of the atmosphere in the northern hemisphere" (*Tellus, 22*, 1970; avec W. Bischof). Et, quelques années avant de devenir l'une des figures les plus en vue de la science du changement climatique et le président du GIEC (1988-1997), Bolin préside entre 1967 et 1971 le Comité d'Organisation du 'Global Atmospheric Research Programme' (GARP ; 1966-79 ; ICSU/WMO). Quant au 'World Climate Research Program' (WRCP), initié par Bolin en 1974, il sera lancé en 1980, mettant un terme au GARP.

Précisons en outre que, à la fin des années 1960, Bolin avait encouragé Crutzen à mener, s'il le souhaitait, des travaux de photochimie stratosphérique. Cette contribution ne constituait-elle pas l'une des pierres nécessaires à l'édification d'une science de l'atmosphère globale ? [Crutzen, 1995]

pour ne pas dire : un rôle de prédicateur de catastrophes globales –, qui tranchait avec la tonalité des articles des principales revues scientifiques.[368] La politique de "mobilisation par la catastrophe" du journal de l'Académie Royale des Sciences de Suède sera particulièrement patente dans les numéros du début des années 1980. Crutzen y publiera un article sur l'Hiver nucléaire (Crutzen & Birks, 1982, "The atmosphere after a nuclear war: Twilight at noon"). Son positionnement sur ce sujet polémique, pour lequel il collaborera comme auteur principal à un rapport SCOPE (1985), atteste son changement radical d'attitude vis-à-vis de son objet. Alors que l'astronome Carl Sagan s'était extrait de la science belligérante façon Guerre froide par le biais des sciences planétaires, qui l'avaient amené à s'interroger sur la pérennité des conditions de vie sur Terre malgré les modifications que leur faisait subir l'homme (expériences de pensée qu'il faisait parfois en imaginant des méthodes de terraformation !), et surtout par le biais de la théorie de l'Hiver nucléaire, P. Crutzen avait quant à lui évolué d'une activité de théoricien (sans lien direct avec le complexe militaire-industriel-universitaire) à une posture de lanceur d'alerte environnementale tous azimuts. Ses alertes sur la couche d'ozone et l'Hiver nucléaire initient en effet une litanie d'annonces de catastrophes globales "atmosphéro-centrées" à venir, qui deviendra l'une des marques de fabrique de Crutzen (au sujet du changement climatique, des pollutions urbaines régionales, des dérèglements des cycles biogéochimiques globaux, et bien sûr l'annonce faite de notre entrée dans une époque nouvelle, l'Anthropocène, décrite comme laissant de très faibles marges de manœuvre politiques). [Crutzen, 1972 **in** Andersen & Sarma, 2002, p. 7 ; journal *AMBIO* ; SCOPE, 1985 ; Dörries, 2011]

Un jour, l'Histoire redessine votre tronc avec sa grande hache. Elle fait de vous un Prix Nobel, elle fait de vous la figure principale d'une théorie créant une nouvelle époque géologique dans laquelle nous nous trouverions (l'Anthropocène), elle fait de vous un ponte

[368] Le journal *AMBIO (« A Journal of the Human Environment »)*, publié en anglais par l'Académie Royale des Sciences de Suède depuis 1972, réussit la gageure de devenir l'un des porte-flambeaux du catastrophisme environnemental planétaire dès les années 1970. Pourtant, il réservait déjà, alors, ses colonnes aux scientifiques universitaires, qui demeuraient à cette époque pour la plupart circonspects au sujet du changement climatique, de la destruction de l'ozone, du risque environnemental du nucléaire, *etc.* Après son "SST's – a threat to the earth's ozone shield" (1972), Paul Crutzen y publia un "Estimates of possible variations in total ozone due to natural causes and human activities" (1974), un "Effects of nitrogen fertilizers and combustion on the stratospheric ozone layer" (en 1977), avec D.H. Ehhalt, puis des quantifications apocalyptiques sur les impacts environnements en cas de guerre nucléaire (la théorie dite de "l'Hiver nucléaire" : "The atmosphere after a nuclear war: Twilight at Noon" (1982, avec J.W. Birks). Dans les années 1990, où l'expertise était à présent organisée en grands groupes internationaux d'élite, il publiera dans *AMBIO* des articles moins catastrophistes, qui chercheront souvent à créer des ponts entre les problématiques de l'environnement atmosphérique : "Ozone and climate changes in the light of the Montreal Protocol, a model study" (1990, avec C. Brühl) ; "On the role of CH_4 in Atmospheric chemistry: Sources, sinks and possible reductions in anthropogenic sources" (1995)). (A l'image de ce qu'il fera, à la même époque, par exemple, dans un ouvrage collectif *Confronting Climate Change – Risks, Implications and Responses* (Mintzer (Ed.), 1992), avec Golitsyn (Crutzen & Golitsyn, 1992, "Linkages between Global Warming, Ozone Depletion, Acid Depletion, Acid Deposition and Other Aspects of Global Environmental Change").)

qui, lorsqu'il parle, est toujours pris au sérieux (même lorsqu'il parle de géoingénierie) (voir Chapitres 8 et 9). Mais, pour l'heure, l'Histoire a simplement saisi le bras de Paul Crutzen. Les Etats-Unis l'appellent. Comme Carl-Gustav Rossby avant lui, comme Bert Bolin, comme Erik Eriksson. Nous sommes en 1974. Crutzen est convaincu par l'importance scientifique et politique de la destruction anthropique de l'ozone. Il traverse l'Atlantique. Il pose ses valises sur le campus de Boulder, en passe de devenir *la* place forte mondiale de la recherche sur l'atmosphère globale, voire sur l'environnement global, sous l'impulsion conjuguée du NCAR, de la NOAA et de la NASA.[369] Crutzen y demeurera pendant six ans. Il se partagera d'abord entre la NOAA et le NCAR (1974-1977), avant d'être nommé à temps plein au NCAR, comme 'Senior Scientist and Director of the Air Quality Division' (1977-1980).

En 1974-75, Crutzen coopère à la rédaction du rapport final du groupe d'experts CIAP. A cette occasion, il collabore avec le jeune chimiste anglais Robert Watson[370] (qui rejoindra en 1976 le 'Jet Propulsion Laboratory' de la NASA). « Bob » Watson deviendra l'une des figures les plus importantes de l'ozone dans les années 1980. C'est également le cas d'une autre chimiste états-unienne Susan Solomon. Diplômée de chimie à l''Illinois Institute of Technology' de Chicago en 1977, elle rejoint Berkeley, où elle obtient son PhD de Chimie en 1981. Elle devient ainsi l'une des premières *chimistes de formation* à faire de la chimie de l'atmosphère globale une spécialité dès sa formation de 3ème cycle. Son premier article avec Crutzen, sur l'ozone troposphérique, est déjà pensé dans une perspective globale. Suivront : en 1980, un article sur l'ozone mésosphérique ; puis, d'autres articles avec Crutzen (retourné pour sa part en Europe), jusqu'en 1982, certaines études étant centrées sur la chimie

[369] En 1974, également, R. Stolarski quitte ainsi son 'Laboratoire de Recherche en Physique Spatiale' de l'Université du Michigan pour la NASA, institution qu'il ne quittera plus, et qui lui permettra de demeurer l'une des figures majeures de la science de l'ozone jusqu'à nos jours (il participera à la rédaction de tous les grands rapports d'experts internationaux). Au sein de la NASA, il déménagera en 1976 du 'Johnson Space Center' pour intégrer définitivement le 'Goddard Space Flight Center' (1976-… ; émérite au sein de l''Atmospheric Chemistry and Dynamics Branch', à partir de 2010). Comme nous le montrerons dans le Sous-chapitre suivant, le 'Goddard Space Flight Center', et plus généralement la NASA, vont attirer à la fin des années 1970 de nombreux chercheurs souhaitant travailler sur la destruction de l'ozone stratosphérique. La NASA travaillera en étroite collaboration avec l'autre haut lieu des recherches sur l'atmosphère globale, dont l'ozone stratosphérique : le campus de l'Université du Colorado, à Boulder. Elle sera dès lors l'une des universités que la NASA financera le plus (c'est encore le cas aujourd'hui). Le NCAR, fondé en 1960, et la NOAA, fondée en 1970 (réunion de l''United States Coast and Geodetic Survey' (1807-1970), du 'Weather Bureau' (1870-1970) et du 'Bureau of Commercial Fisheries' (1871-1970)), y ont implanté la majeure partie de leurs activités de recherche scientifique. Le campus de Boulder va ainsi devenir, à partir de la fin des années 1970, *la* place forte mondiale de la recherche sur l'atmosphère globale, voire sur l'environnement global. [CV de Richard Stolarski, http://acd-ext.gsfc.nasa.gov/People/Stolarski/resume.html (02/10/2012); Site de l'Université du Colorado, http://www.colorado.edu/ (02/10/2012)]

[370] *Cf.* Johnston, H. S., D. Garvin, M. L. Corrin, P. J. Crutzen, R. J. Cvetanovic, D. D. Davis, E. S. Domalski, E. E. Ferguson, R. F. Hampson, R. D. Hudson, L. J. Kieffer, H. I. Schiff, R. L. Taylor, D. D. Wagman and R. T. Watson, 1975: Chemistry in the stratosphere, Chapter 5, CIAP Monograph 1. The Natural Stratosphere of 1974, DOT-TST-75-51, U.S. Department of Transportation, Climate Impact Assessment Program.

stratosphérique.[371] En 1981, elle rejoint le 'Laboratoire d'Aéronomie' de la NOAA comme Chercheure en Chimie.

Nous tenons là un premier indice de *la création d'une discipline scientifique chimie de l'atmosphère globale au début des années 1980* : la *création d'un poste universitaire* consacré à la chimie de l'atmosphère globale. Il s'agit, ici, plus précisément, de la chimie des moyenne et haute atmosphère, la chimie des aéronomes. C'est en effet l'activité scientifique générée aux États-Unis par le programme actif d'expertise sur l'ozone qui a abouti à la création de premiers postes de chercheurs en chimie au sein des laboratoires d'aéronomie. Suivront, à la NOAA, au NCAR et à la NASA (de même qu'en Europe), des chaires universitaires consacrées à la chimie atmosphérique.

L'autre indice de naissance d'une nouvelle discipline scientifique est la *création d'un journal spécialisé* dans la chimie atmosphérique, en langue anglaise, en 1983 : le *Journal of Atmospheric Chemistry*. Celui-ci offre une tribune à l'ensemble des études sur la chimie atmosphérique. Il fait la part belle, en particulier, à la chimie atmosphérique globale ou à grande échelle. Et pour cause, il a été fondé par Paul Crutzen, de retour en Europe (au Max-Planck Institut für Chemie, Mainz) et Dieter H. Ehhalt (de l'Institut für Atmosphärische Chemie Forschungszentrum, Jülich). Ce dernier avait rejoint le NCAR dès 1969 ; puis, il l'avait quitté en 1974, en apportant auparavant sa contribution au CIAP.[372] Ehhalt était donc, comme Crutzen, plutôt un spécialiste de la chimie atmosphérique à grande échelle.

Les deux chercheurs européens donnent à leur journal la double tâche de réunir des publications jusqu'à présent éparpillées « dans de nombreux journaux de diverses disciplines mitoyennes », et « de rendre plus visible l'ensemble du champ de la chimie atmosphérique », aussi bien la chimie troposphérique que l'aéronomie chimique. Mais, comme nous l'avons indiqué, dans le *Journal of Atmospheric Chemistry*, une place importante est accordée à la chimie globale ou à grande échelle. De plus, dans l'éditorial du premier numéro, Crutzen et Ehhalt précisent que l'énorme expansion de la chimie atmosphérique qui s'est produite au début des années 1970 a été déclenchée par les alertes à la destruction anthropique de l'ozone par les SST et CFC [Crutzen & Ehhalt, 1983].

---

[371] Réfs : Fishman, J., S. Solomon and P. J. Crutzen, 1979: Observational and theoretical evidence in support of a significant in situ photochemical source of tropospheric ozone. Tellus, **31**, 432-446. ; Crutzen, P. J. and S. Solomon, 1980: Response of mesospheric ozone to particle precipitation. Planet. Space Sci., **28**, 1147-1153. ; Solomon, S., D. W. Rusch, J. C. Gérard, G. C. Reid and P. J. Crutzen, 1981: The effect of particle precipitation events on the neutral and ion chemistry of the middle atmosphere - II. Odd Hydrogen. Planet. Space Sci., **29**, 885-892. ; Solomon, S., P. J. Crutzen and R. G. Roble, 1982: Photochemical coupling between the thermosphere and the lower atmosphere. 1. Odd nitrogen from 50-120 km. J. Geophys. Res., **87**, 7206-7220. [Crutzen, 2010, pp. 6-7]

[372] *Cf.* Ehhalt D.H., Heidt L.E., Lueb R.H. & Roper N., 1974, *Proc. 3rd Conference on the Climatic Impact Assessment Program*, Cambridge, Mass., 1974, February 26-March 1, pp. 153-160.

Une précision importante : à partir des années 1980, la « chimie atmosphérique ('atmospheric chemistry') » ne saurait, certes, plus être synonyme d'un champ d'étude sur la composition de l'atmosphère qui ne prendrait pas en compte les interactions chimiques atmosphériques. Toutefois, les travaux académiques regroupés sous l'étiquette « chimie atmosphérique ('atmospheric chemistry') », par exemple dans le *Journal of Atmospheric Chemistry*, ne concernent pas exclusivement des considérations théoriques sur les interactions chimiques dans l'atmosphère. En effet, une telle connaissance est conditionnée par d'autres connaissances ; en particulier, par les transports des composés atmosphériques, leurs sources, et leurs puits autres que l'atmosphère (le vivant terrestre et maritime, notamment). La formalisation des interactions chimiques atmosphériques nécessite un dialogue avec de nombreuses sciences de l'environnement.[373] Enfin, les réflexions et les

[373] Depuis les années 1980, les écrits scientifiques sur les interactions chimiques dans l'atmosphère sont publiés dans des revues spécialisées à comité de lecture qui, à l'exception du *Journal of Atmospheric Chemistry* (co-fondé par P. Crutzen en 1983), portent des noms qui dénotent la volonté de leur rédacteurs en chef d'embrasser une vision sur l'atmosphère la plus transdisciplinaire possible (physique, chimie, biologie, écologie, *etc.*) – par exemple, *Atmospheric Environment*, *Atmospheric Chemistry and Physics, Journal of Atmospheric Sciences*. En outre, l'atmosphère est définie comme une « sphère » connectée à d'autres (biosphère, lithosphère, océans). Aussi, les chimistes de l'atmosphère préoccupées par les questions globales publient-ils fréquemment dans des revues nommées *Global Biogeochemical Cycles*, *Biogeochemistry*, *Photochemical & Photobiological Sciences*, ou encore *Chemosphere: Global Change Science.*

Ensuite, depuis les années 1970, les travaux de chimistes de l'atmosphère sont publiés par certains éditeurs désireux de regrouper les études sur les problèmes communément qualifiés d'environnementaux, en particulier ceux relatifs aux pollutions anthropiques. Par exemple, dans *Water, Air & Soil Pollution*, *International Journal of Environment and Pollution*, *Environmental Research Letters*, *etc.* ; ou encore, dans *AMBIO: A Journal of the Human Environment*, publié par l'Académie royale de Suède, qui a été l'une des premières revues de ce type (très centrée, dès ses débuts en 1972, sur les modifications de l'environnement à grande échelle). Puis, les revues de « météorologie » telles que le *Bulletin of the American Meteorological Society*, *La Météorologie* ou *Climatic Change* accueillent également des travaux de chimistes de l'atmosphère.

Par ailleurs, de nombreux travaux de chimie atmosphérique globale ont été publiés dans des revues de « géophysique » (*Reviews of Geophysics*, *Geophysical Research Letters, Journal of Geophysical Research*, ou encore "*Eos, Transactions, American Geophysical Union*"). Cette tendance était particulièrement lourde jusqu'au tournant des années 1970, où la formalisation chimique de l'atmosphère globale se limitait presque exclusivement à la haute atmosphère, beaucoup moins complexe chimiquement que la troposphère. Ces études étaient menées par des géophysiciens et des astronomes.

Signalons, enfin, que certains travaux de chimie atmosphérique sont publiés dans des revues liées à la pratique instrumentale des scientifiques – soit à leurs mesures *in situ* (*Journal of Molecular Spectroscopy*, *Applied Optics*, *International Journal of Remote Sensing, etc.*), soit à leurs mesures en laboratoire (par exemple, *Applied Physics B Photophysics and Laser Chemistry*). Plus rarement, des revues de chimie "générale" glissent des articles de chimie atmosphérique (ainsi, le *Canadian Journal of Chemistry* ou le *Journal of the American Chemical Society*). Il s'agit alors presque exclusivement de travaux discutant le devenir de polluants émis par l'industrie chimique. Certains articles sont bien sûr publiés dans les revues "généralistes" des sciences de la nature telles que *Science* ou *Nature*. Mentionnons, pour finir, que le prestigieux journal *Tellus*, fondé en 1949 par la Société géophysique de Suède à l'initiative de l'illustre météorologiste suédo-états-unien Carl-Gustaf Rossby (1898-1957), puis repris en main par l'Institut météorologique international de Stockholm en 2009, a la particularité d'être publié en libre accès sur Internet depuis le 1er janvier 2012. (Remarque : la liste de types de revues à comité de lecture que nous venons de dresser n'est pas exhaustive.)

Quant aux chimistes des smogs, qui ont initié le champ d'étude des réactions chimiques troposphériques aux échelles locales ou régionales au cours des années 1950, bien que chimistes de formation dans leur grande majorité (c'est par exemple le cas des deux grandes figures Arie Haagen-Smit et Philip Leighton), ils publiaient au cours des décennies 1950-60 principalement dans des revues de chimie générale (*Journal of the American Chemical Society*), de chimie physique et de physique chimique (*Journal of Chemical Physics*), d'ingénierie (*Industrial & Engineering Chemistry, Rubber Chemistry and Technology*) et de gestion ('management / control') des pollutions de l'air (*Journal of the Air Pollution Control Association*), d'épidémiologie (*Archives of Environmental Health*, *California Journal of He*alth), dans les quelques revues consacrées spécifiquement à la pollution de l'air (*International Journal of Air Pollution*). Mais, ils publiaient aussi

modélisations des chimistes de l'atmosphère sont irrémédiablement tributaires de la métrologie des composants atmosphériques – ou comment la « chimie atmosphérique » comme théorie chimique est indissociable de la « chimie atmosphérique » comme synonyme de « composition chimique ».

En définitive, deux caractéristiques marquent les débuts de la discipline "chimie de l'atmosphère globale" à la fin des années 1970.[374] D'abord, des *aéronomes*, les théoriciens les plus anciens des processus chimiques atmosphériques, s'impliquent de manière décisive dans le processus de création de la discipline. Ensuite, cette genèse se fait dans une perspective de protection environnementale, avec *l'affaire de l'ozone comme premier prétexte*. L'ozone est l'un des constituants-clefs qui donne sa cohérence à la chimie atmosphérique : il fait le lien entre question *locale* de smog photochimique et question *globale* de destruction du bouclier anti-UV ; et, puisque les échanges d'ozone entre les deux régions deviennent des nécessités pour comprendre les deux phénomènes, l'ozone fait le lien entre *basse atmosphère* et *haute atmosphère*.

Le timide programme de recherche européen sur la destruction de l'ozone. L'exemple français

Le fait que la question de la destruction de la couche d'ozone ait été aussi décisive dans la genèse d'une discipline spécifique traitant des interactions chimiques atmosphériques a pu faciliter l'accès des Européens aux hautes sphères de la recherche en chimie atmosphérique. En effet, l'Europe avait produit des aéronomes théoriciens de renom, que les Etats-Unis accueillirent à bras ouverts, comme ils avaient accueilli auparavant des météorologistes tels que Rossby ou Junge. On retrouve aujourd'hui, parmi les plus influents chimistes de l'atmosphère globale, des chercheurs formés en Europe passés par les laboratoires états-uniens dans les années 1970 (certain s'y sont implantés, ou ont partagé leur temps entre les continents européen et américain). Par exemple, P. Crutzen et G. Brasseur.

Parallèlement, dans les années 1970, la recherche aéronomique en Europe souffrit du manque de mobilisation politique autour de la destruction de l'ozone, ainsi que de la faiblesse de ses travaux d'aéronomie empirique *in situ* par rapport aux Soviétiques et aux Etats-Uniens. En définitive, dans les années 1970, les Etats-Unis furent un passage presque obligatoire pour les physico-chimistes de l'atmosphère européens (ou asiatiques (Indiens, Japonais, Chinois), ou sud-américains), qu'ils s'intéressassent aux questions globales ou à

chez des éditeurs de travaux géophysiques (*Advances in Geophysics*) [Bonner, 1989, pp. 211-215 ; Leighton, 1961, pp. 285-291].

[374] On peut également parler d'elle comme "*sous-discipline*" des sciences de l'atmosphère.

des questions plus locales (ils pouvaient notamment travailler sur les échanges d'ozone entre troposphère et stratosphère, mais aussi prendre part à l'ambitieux programme sur le smog photochimique californien, qui n'avait pas d'équivalent dans le monde).

L'affaire Concorde offre un programme de recherche non-belligérant à l'aéronomie française

Dans les années 1970, les alertes et l'essentiel des travaux scientifiques sur la destruction anthropique de l'ozone sont produits aux Etats-Unis. Mais, s'il n'existe alors aucune esquisse de gouvernance des SST ou des CFC commune à l'Europe et aux Etats-Unis, les savoirs transitent rapidement d'un côté de l'Atlantique à l'autre. De plus, l'Europe possède une tradition ancienne d'étude sur l'ozone stratosphérique, grâce à ses 'Dobson' notamment. Enfin, les Français et les Britanniques se sont lancés dans le projet Concorde au début des années 1960, et persistent dans les années 1970. Pour toutes ces raisons, un pôle européen de recherche sur la destruction anthropique de l'ozone se constitue dans les années 1970. Il est principalement focalisé sur les émissions du Concorde, même après l'alerte de Molina-Rowland sur les CFC en 1974. Dans un premier temps, nous montrons que ce programme offre à l'aéronomie française l'un de ses premiers programmes de recherche "non belligérants".

Le Service d'Aéronomie (SA ; 1958-2008), situé en région parisienne, est resté le principal laboratoire d'aéronomie français au cours de ses cinquante ans d'existence (en 2008, il a été phagocyté par le LATMOS (Laboratoire Atmosphères, Milieux, Observations Spatiales)). Au début des années 1970, le personnel de recherche recruté au SA ne compte aucun chimiste de formation, et se compose presque exclusivement de physiciens [*Cf.* Chanin, 2008, pp. 453-472 & 493-499]. Parmi eux, Jean-Pierre Pommereau, qui est entré au SA en 1967. Quarante-et-un ans plus tard, il se remémorait *l'importance du programme Concorde* pour l'aéronomie française :

> Au début des années 1970, les premiers « résultats » des « modèles balbutiants » calculant la destruction de l'ozone par les NO_x « suggéraient qu'une flotte de 500 Concorde franco-anglais alors prévue par l'Aerospatiale, pourrait conduire à une réduction significative de 10 ou 15 % de la teneur de la stratosphère en ozone vers 16-18 km. Un programme de recherche, le Comité sur les Vols Supersoniques (COVOS) fut mis en place en France auquel le SA allait participer. Les actions du SA ont porté en premier lieu sur la mesure d'un oxyde d'azote, NO_2, à l'aide d'un photomètre multicanaux visible suivant une technique développée par John Noxon aux USA. Embarqué à côté d'un ensemble d'appareils européens et américains sur le prototype Concorde 001, il a participé à 14 vols successifs de mesures des oxydes d'azote à l'altitude de croisière de l'avion (thèse de FG. Souchon 1976). Par la suite le même appareil fut embarqué sous ballon pour une étude de la chimie des

> NO_x et de leur variation diurne dans la stratosphère, sujet de ma thèse de doctorat [(il s'agit à l'époque d'une thèse dite de « Doctorat d'Etat », intitulée *Recherches sur le dioxyde d'azote NO_2 dans l'atmosphère de la Terre* (1981 ; Univ. Paris VI)]. De son côté, l'équipe lidar[375] tentait de mesurer le profil de NO_2 mais avec moins de succès ou encore les poussières dans la traînée de Concorde et pour finir mettait au point un premier lidar ozone (thèse de 1973 et 1976, et publication de Mégie *et al.*, 1977). » [Pommereau, 2008 **in** Chanin, 2008, pp. 258-259 & 454]

« L'effort fut payant sur le plan scientifique dans la mesure où les nouveaux instruments ont placé le laboratoire en excellente position pour les programmes qui suivront », affirmait rétrospectivement Jean-Pierre Pommereau [Pommereau, 2008 **in** Chanin, 2008, p. 259]. Même son de cloche chez un autre jeune membre du SA à l'époque, Alain Hauchecorne[376], qui reconnaît l'élan donné à la recherche aéronomique par l'affaire de l'ozone.

Le programme COVOS offrira au SA une *première échappatoire à la recherche aéronomique de type Guerre froide* telle qu'elle y avait été menée depuis 1958, et qui répondait très souvent à un partage d'intérêt entre les aéronomes-astronomes et une l'armée française en quête d'innovations technologiques balistiques, aéronautiques et spatiales (voir notre Chapitre 3 et Blamont, 2008 **in** Chanin, 2008, pp. 16-43). *Il n'en demeure pas moins* que les nouvelles études aéronomiques des années 1970 portant sur l'impact des émissions des avions supersoniques (ou des fusées) ne reçoivent pas uniquement les encouragements de l'Académie des Sciences, qui s'ouvre avec COVOS à l'étude des impacts environnementaux de l'homme sur la stratosphère, mais également du *couple armée-aérospatiale*. Deux raisons principales à cela. D'abord, la continuation d'un programme que nous avons présenté dans le Chapitre 3 : De Gaulle a lancé en France un programme spatial (certes de faible ampleur, mais plus ambitieux que celui de ses voisins européens) ; or, celui-ci passe par le développement de petites fusées (et, parallèlement, chose décisive : de lanceurs) ; et, ces fusées, qui sont des progénitures de missiles, peuvent servir de fusées météorologiques – d'où l'implication du fondateur du SA, Jacques Blamont, auprès des militaires. Ensuite, la France a poursuivi ses essais nucléaires atmosphériques postérieurement à 1962 (à l'inverse du Royaume-Uni, de l'URSS et des Etats-Unis), jusqu'en 1973. Comme en atteste le témoignage

375 Le lidar, acronyme de 'LIght Detection And Ranging', fonctionne de la même façon qu'un radar ('RAdio Detection And Ranging') ou qu'un sadar ('Sound Detection And Ranging'), à la différence près qu'il projette un faisceau laser pour sonder l'atmosphère (on l'appelle parfois « radar laser »). Alors qu'il balaye l'atmosphère, le faisceau laser est dispersé par les molécules et les particules en suspension. A l'aide du lidar, il est par exemple possible d'évaluer l'altitude des aérosols, y compris d'observer des couches de brume ou de cirrus qui demeurent invisibles à l'œil nu en raison de leur faible densité. Pour une histoire des lasers et les lidars au SA, voir Pelon Jacques, 2008 **in** Chanin (Dir.), 2008, pp. 193-213.

376 Alain Hauchecorne intègre quant à lui le SA en 1973, au sortir de l'Ecole Polytechnique, après que le président du SA Jacques Blamont est venu faire la promotion de l'aéronomie à l'X. Alain Hauchecorne travaille dans un premier temps aux côtés de Jean-Pierre Pommereau, sur la dynamique de la stratosphère.

qu'Alain Hauchecorne m'a adressé, jusqu'au milieu des années 1970, l'étude des particules radioactives issues des essais nucléaires atmosphériques peut être financée par les militaires, et ainsi servir la recherche sur les dynamiques atmosphériques à grande échelle, dont stratosphériques, au SA.[377] Dans la continuité de la logique des années 1950-60, l'armée demeure un moteur financier important de l'activité de recherche aéronomique en France dans les années 1970.

Ensemble, le programme COVOS et les financements militaires permettent au SA de réaliser des travaux stratosphériques pertinents dans le cadre des études nouvelles sur la destruction de l'ozone. La recherche du SA parvient bientôt à se faire une petite place au sein de la communauté internationale de l'ozone, notamment par le biais de ses mesures lidar, et sous l'impulsion de Gérard Mégie.[378] Le programme COVOS a même permis au SA d'initier des mesures systématiques de NO_x (à l'aide d'un photomètre embarqué sur le prototype Concorde 001 (thèse de G. Souchon ; 1976), ou sur des ballons, ou encore à l'aide de lidars), et même une étude de la chimie des NO_x et de leur variation diurne dans la stratosphère (Pommereau). Toutefois, les financements publics pérennes sur les impacts des émissions anthropiques sur l'ozone apparaîtront tardivement en France, principalement dans le cadre de programmes de la CEE sur les CFC. Jusqu'au début des années 1980, la recherche est en effet restée embryonnaire, y compris au sujet des CFC, chaque pays européen ayant son propre programme [Hauchecorne, 2011 ; Chanin (Dir.), 2008]. La liste des thèses soutenues au SA entre 1975 et 1990 montre que les recherches pouvant être versées au dossier de la recherche sur la destruction anthropique de l'ozone ne prirent une importance qu'à partir de

[377] Les derniers essais nucléaires atmosphériques français auront lieu en 1973, et les derniers dans le monde, par la Chine, en 1980, mettant fin à une longue et prolifique tradition d'étude atmosphérique. Alain Hauchecorne :

> « Au début [de mon travail au SA, en 1973-74], il y a eu des financements militaires, car à l'époque on faisait des explosions nucléaires dans l'atmosphère... ce qui est un peu de la folie, mais enfin {rires}… et ils se sont aperçus qu'ils retrouvaient des masses d'air radioactives à des endroits où ils ne s'y attendaient pas du tout, et donc il y avait un problème dans la compréhension des masses d'air… Ca [ce programme d'étude] dépendait de la DGA [Direction Générale de l'Armement], mais c'était la DRET [Direction des Recherches et Etudes Techniques], à l'époque, la partie recherche de la DGA, qui finançait des études [scientifiques]. » [Hauchecorne, 2011, entretien avec l'auteur]

[378] Dans le grand rapport international *Atmospheric Ozone* de 1985, on trouve le SA dans la liste des institutions ayant participé aux campagnes d'intercomparaisons d'instruments, Gérard Mégie dans la liste des contributeurs, et des références aux travaux des membres du SA. Par exemple,

> Mégie, G., and J. E. Blamont, Laser sounding of atmospheric sodium, Interpretation in terms of global atmospheric parameters, *Planet. Space Sci., 25,* 1093-1109, 1977 ;
>
> Mégie, G., and R. T. Menzies, Complementarity of UV and IR differential absorption lidar for global measurements of atmospheric species, *Appl. Optics, 19,* 1173-1183, 1980 ;
>
> Mégie, G., J. Y. Allain, M. L. Chanin, and J. E. Blamont, Vertical profile of stratospheric ozone by lidar sounding from the ground, *Nature, 270,* 329-331, 1977 ;
>
> Pommereau, J. P., Observation of NO2 diurnal variation in the stratosphere, *Geophys. Res. Lett., 9,* 850-853, 1982 ;
>
> Roscoe, H. K., B. J. Kerridge, S. Pollitt, M. Bangham, N. Louisnard, C. Alamichel, J. P. Pommereau, T. Ogawa, N. Iwagami, M. T. Coffey, W. Mankin, J. M. Fland, C. Camay-Peret, F. J. Murcray, A. Goldman, W. F. J. Evans, and T. McElroy, Intercomparison of stratospheric measurements of NO and NO2, in *Atmospheric Ozone,* edited by C. S. Zerefos and A. Ghazi, pp. 149-156, D. Reidel, Dordrecht, 1985a ;
>
> Roscoe, H. K., B. J. Kerridge, S. Pollitt, M. Bangham, N. Louisnard, C. Alamichel, J. M. Flaud, C. Camy-Peyret, J. R. Pommereau, T. Ogawa, N. Iwagami, M. T. Coffey, W. Mankin, F. J. Murcray, A. Goldman, W. F. J. Evans, T. McElroy, and J. Kerr, Intercomparison of remote measurements of stratospheric NO and NO2, to be published, 1986. [*WMO*/…, 1985, pp. 952, 1039, R-53, R-62, R-69-70, R-70]

1984-85 (dates de début de thèses de 3ème cycle et de thèses de doctorat d'Etat soutenues entre 1985 et 1988) [Chanin, 2008, liste des thèses, pp. 453-468].

Quelques éléments pouvant expliquer la faiblesse du programme européen, du Concorde aux CFC

Si l'importance de l'affaire de l'ozone pour le développement et la reconversion environnementale de l'aéronomie française est attestée, Jean-Pierre Pommereau fait le constat qu'une *chute rapide des enjeux scientifiques* s'est produite autour de la question de l'impact du Concorde sur l'ozone au cours des années 1970. « Sur le plan de l'avenir du Concorde », écrit-il, nos études eurent peu d'impact » [Pommereau, 2008 **in** Chanin, 2008, pp. 258-259]. Nous proposons ici quelques éléments explicatifs, épistémologiques et politiques, à cette apathie du programme atmosphérique européen sur le Concorde, ainsi que sur les CFC, *à partir de témoignages de spécialistes français de la stratosphère*.[379]

Nous pouvons, pour commencer, pointer des raisons propres à la communauté scientifique européenne. Tout d'abord, si l'Europe compte dans ses rangs spécialistes éminents de l'aéronomie chimique (Nicolet, Bates), elle n'a pu pas bénéficier de l'apport de chimistes. A l'inverse des Etats-Unis, les épisodes de smogs photochimiques sont rares en Europe à l'époque, et les taux d'ozone urbains mesurés ne sont pas spectaculaires… lorsqu'ils sont effectivement mesurés.[380] Johnston a bénéficié de l'émulation autour du smog photochimique californien (notamment autour des deux grandes figures Haagen-Smit et Leighton) [Johnston, 1992, pp. 10-13]. Or, ce sont des chimistes s'intéressant aux pollutions atmosphériques, H. Johnston en particulier, qui ont stimulé la recherche sur la destruction chimique de l'ozone stratosphérique aux Etats-Unis (ainsi que, autre tradition plus en retrait

---

[379] Le lecteur trouvera des travaux sur la controverse sociotechnique européenne autour du Concorde (par exemple, les travaux de Kenneth Owen). En revanche, nous n'avons pas trouvé de travaux d'historien sur le programme Concorde en lien avec l'expertise européenne sur l'ozone, contrairement à ce qu'a pu faire outre-Atlantique Erik Conway au sujet des SST, dans Conway, 2005 (mais, il n'aborde qu'à la marge le programme Concorde). En France, toutefois, le sociologue Morgan Jouvenet (Université de Versailles-Saint-Quentin-en-Yvelines) a entamé en 2013 un travail sur les échanges entre communauté scientifique et pouvoirs publics (chargés de la recherche scientifique), sur la question stratosphérique, en France, dans les années 1970 (sur la base d'archives de la DGRST (Délégation Générale à la Recherche Scientifique et Technique), d'articles de presse, et d'entretiens dans les ministères et les laboratoires français). Voir http://zilsel.hypotheses.org/352 (05/09/2014)

[380] En 2009, le groupe d'experts de la qualité de l'air britannique *Air Quality Expert Group* rappelait que, « bien que la surveillance des niveaux d'ozone dans les localités rurales ait commencé en Europe dans les années 1970, celle des localités urbaines est une activité relativement récente. » En effet, les grandes villes européennes se sont équipées, pour la plupart, de réseaux de mesures de l'ozone dans les années 1990-2000 seulement (même si, souvent, plus précocement pour le SO_2) [*Air Quality Expert Group (UK)*, 2009, pp. 41-42]. Il faut préciser que, par ailleurs, les taux d'ozone troposphériques sont estimés de longue date en Europe à l'aide des spectromètres Dobson (méthode Umkehr) et de ballons-sondes, avec des observations standardisées et régulières pour les latitudes moyennes de l'Hémisphère nord depuis le milieu des années 1960. Mais, pas les taux d'ozone spécifiques, localisés, des agglomérations, à l'inverse des Etats-Unis, qui se sont lancés dans cette entreprise à l'époque de la signature du Congrès pour un nouveau 'Clean Air Act' à la charge de l'EPA, en 1970 (et même dans des mesures systématiques, plus périlleuses, des NO_x, à la durée de vie très courte et donc aux concentrations très changeantes). [Dignon & Hameed, 1985, pp. 491 & 493-494].

en Europe : les scientifiques des atmosphères planétaires). Alors que l'alerte a été donnée sur la base d'une théorie chimique, les études sur la stratosphère en Europe – dont celles du SA – demeurent principalement focalisées sur la dynamique atmosphérique dans les années 1970 (par le biais d'observations depuis le sol et de mesures *in situ*).[381] Le fait que Robert Watson, chimiste de laboratoire, émigre en 1973 aux Etats-Unis pour travailler sous la coupe de H. Johnston, après l'obtention de son doctorat de chimie à l'Université de Londres, témoigne peut-être autant de l'attractivité de la recherche états-unienne sur la destruction de l'ozone, que de la place secondaire qui est faite en Europe aux chimistes pour travailler sur l'ozone stratosphérique, champ d'étude dominé sans partage par des astronomes et météorologistes (cette hypothèse mériterait, nous semble-t-il, d'être étudiée). [Johnston, 1992, pp. 27-28 ; Garfield, 1992, p. 59]

Lorsque, en 1972, le Ministère français des transports crée le COVOS, un Groupe d'Etudes sur les 'Conséquences des Vols Stratosphériques' placé sous l'égide de l'Académie des Sciences, la personne qui fait autorité en Europe sur la question de l'ozone est à un aéronome de l'ancienne génération, le Belge Marcel Nicolet (1912-1996). Ce dernier, membre de l'Académie royale des Sciences, des Lettres et des Beaux Arts de Belgique, répond favorablement à la sollicitation de ses pairs français. Son estimation du potentiel de destruction de l'ozone par les oxydes d'azote produits par les moteurs d'avions stratosphériques fera nécessairement autorité au sein de la communauté européenne.[382]

Les premiers travaux de Nicolet sur les impacts des vols des avions stratosphériques sur l'ozone datent de 1972. Dans son article de 1972, il estime qu'une « flotte de 500 avions supersoniques » n'introduirait pas des quantités inhabituelles de composés destructeurs d'ozone pouvant occasionner de grave destruction d'ozone stratosphérique [Nicolet, 1972]. Entre 1974 et 1977, période d'élaboration du rapport COVOS, son schème théorique s'étoffe, et surtout les données affluent en provenance des Etats-Unis. Toutefois, le *Rapport COVOS*

---

[381] Aux yeux de la recherche aéronomique française les aspects dynamiques demeurent les plus importants. Elle n'est alors orientée, ni vers les aspects chimiques de la stratosphère, ni vers les impacts environnementaux des SST sur la couche d'ozone, le climat ou la météorologie, mais vers des questions de météorologie à grande échelle, telles que celles qu'aborde Alain Hauchecorne :

> En 1973, raconte-il, Jacques Blamont, directeur du Service d'Aéronomie « m'avait obtenu une bourse CNES pour une thèse sur la dynamique de la stratosphère, à l'aide de ballons pressurisés de longue durée, qui pouvaient faire des vols de plusieurs mois ; et en particulier dans l'hémisphère sud, à cause des problèmes de sécurité aérienne. Je faisais ça avec J-P Pommereau : il s'agissait de suivre la trajectoire des ballons, pour comprendre la dynamique des masses d'air. On avait des ballons originaux, qui arrivaient aussi à suivre la dynamique verticale de l'air, en suivant les surfaces isentropes. Pour le faire monter et descendre, il y avait une pompe, qui remplissait un ballonnet intérieur… [On lançait les ballons de] Kourou [(la base spatiale guyanaise a été construite en 1965)] ; puis on a fait des vols depuis Pretoria en Afrique du Sud. » [Hauchecorne, 2011]

[382] Son aide est également demandée par le Ministère des Transports des États Unis [Ackerman & Jaumotte, 2011, p. 36]. Il faut ajouter que, en Europe, des programmes semblables sont lancés, et pas uniquement en France et au Royaume-Uni. A partir de 1971, les Académies des Sciences et la CEE sont demandeurs d'expertises savantes, ainsi que les jeunes Ministères de l'Environnement (le 'Department for the Environment' du Royaume-Uni fut créé en 1970, le 'Ministère de l'Environnement français en 1971, et le 'Ministère de la Santé publique, de l'Environnement et de la Famille' belge en 1973).

qu'il délivre finalement en 1978, intitulé « Etude des réactions chimiques de l'ozone dans la stratosphère », ne tire aucune conclusion sur les risques liés aux avions supersoniques, et se présente comme un manuel de chimie de l'ozone stratosphérique de 536 pages.[383] Lorsque Nicolet évoque l'hypothèse de Johnston, il en parle en termes de « possibilité de l'effet perturbateur des avions volant dans la stratosphère » [Nicolet, 1978, p. 384]. Au cours des années 1970, où ils demeurent basés en Europe, ni l'aéronome, ni son jeune collègue et compatriote Guy Brasseur (qui reste à l'époque dans la ligne "agnostique" des travaux de son directeur de thèse)[384], ne lancent l'alerte en Europe. Ils s'en tiennent à reconnaître la possibilité d'une destruction de l'ozone stratosphérique, en cas de développement d'une flotte d'avions supersoniques très importante.

Des facteurs sociaux intrinsèques à la communauté scientifique peuvent être invoqués pour expliquer pourquoi, à l'inverse des jeunes chimistes lanceurs d'alerte, Nicolet n'adopta jamais une position catastrophiste au sujet des SST. Nicolet était un physicien de formation, et surtout un chercheur de l'ancienne génération, qui ne s'était jamais alarmé au sujet de la possibilité de déséquilibres atmosphériques. Sa génération, celle des Chapman et Dobson, avait passé une vie entière à contempler une couche d'ozone toujours régénérée.[385] Nicolet avait en outre toujours privilégié une approche "contemplative", "théoricienne" de l'atmosphère, une "approche d'astronome", "koyréenne" (*Cf.* Koyré, 2008 (1961)), à l'écart du complexe militaire-industriel-universitaire.[386] Il saute aux yeux, à la lecture de l'article de

---

[383] Malgré « divers concours du Fonds National de la Recherche Scientifique de Belgique, du Service d'Aéronomie du [CNRS français], [… de la] NASA [, *etc.*] », la publication de son rapport COVOS ne se fait pas avant le début de l'année 1978. Elle a été retardée par « des difficultés matérielles », expliquera Nicolet dans l'« avertissement au lecteur » de son « Etude des réactions chimiques de l'ozone dans la stratosphère » (1978) [Nicolet, 1978, p. 7]. Suivent d'autres publications sur l'ozone et les SST, en 1979 (Nicolet, 1979, « Conséquences chimiques de l'avion dans la stratosphère » ; Nicolet, 1979, « L'avion dans la stratosphère »), dont un rapport sur « l'ozone atmosphérique et ses problèmes » pour la CEE (*cf.* Nicolet, 1979 **in** *Research on the ozone shield depletion problem under CEE co-ordination, Proc. 2d meeting*).

[384] Au moment où éclate la controverse sur la destruction de l'ozone par les SST aux Etats-Unis, Guy Brasseur est étudiant-ingénieur. En 1971, il obtient un diplôme d'ingénieur en Physique, puis un second trois ans plus tard, cette fois en Télécommunications et Electronique. Ce second diplôme n'est toutefois pas une fin en soi pour Brasseur, qui obtient, au cours de la même année 1974, un Doctorat dans la même 'Université Libre de Bruxelles' portant sur « les effets des oxydes d'azote sur la couche d'ozone stratosphérique, en particulier les potentiels impacts stratosphériques des flottes d'avions supersoniques prévues », et dirigée par Marcel Nicolet. En 1988, Brasseur intégrera le NCAR, dont il deviendra en 1990 le directeur de l''Atmospheric Chemistry Division'. Ses travaux pour l'IPCC et pour l'IGBP, ainsi que son activité éditoriale, au cours des années 1990-2000, en ont fait une personnalité influente de la chimie atmosphérique globale, de la science du CC, et de la science dite du "Système Terre".

[385] Marcel Nicolet, qui mourra en 1996 à l'âge de 84 ans, était dans les années 1970 la dernière des trois grandes figures de la science de l'ozone d'après-guerre à poursuivre ses travaux de recherche, Sydney Chapman étant décédé en 1970 et Gordon Dobson ayant publié son dernier article en 1973, trois ans avant sa mort.

[386] Comme son ami Sydney Chapman et comme Alexandre Koyré, Nicolet se passionnait pour les cultures anciennes et l'astronomie. Il avait dans un premier temps poursuivi ses humanités à l'Université (en philologie), avant de se diriger vers l'astrophysique, comme le rapportent Ackerman et Jaumotte :

> « Marcel Nicolet […] était né le 26 février 1912. Après ses études en humanités gréco-latine[s], il commença des études en philologie à l'Université de Liège. Se ravisant après quelques mois il changea d'orientation et s'inscrivit comme étudiant à la faculté des sciences pour obtenir une licence en physique en 1934 après la présentation d'un mémoire sur « Le spectre des étoiles O et B ». Ce travail fut publié dans Astrophysical Journal avec Paul Swings. Remarqué par Jules Jaumotte, directeur de l'Institut Royal Météorologique de Belgique à Uccle, il devint membre du personnel de cette institution en 1935. » [Ackerman & Jaumotte, 2011, p. 31]

1972 et de l'ouvrage de 1978, que la visée de Nicolet demeure la construction de schèmes raffinés sur l'ozone, et non l'alerte environnementale – ne sont-ils pas intitulés "Aeronomic Chemistry of the Stratosphere" et « Etude des réactions chimiques de l'ozone dans la stratosphère », respectivement ? Et, comme membre d'une vieille tradition de recherche, l'astronomie, plus ancienne encore que la météorologie de Scorer, Nicolet considérait les nouveaux savoirs avec prudence. L'urgence dont firent preuve les chimistes nouvellement venus à l'étude de la stratosphère n'était pas sa manière d'aborder les questions.[387] En outre, l'activité scientifique qu'il poursuivit sur les rayons UV et la chimie stratosphérique après 1978 ne montre toujours pas la volonté d'adopter, au crépuscule de sa carrière, une démarche de "scientifique pour la sauvegarde de l'environnement".

On ne saurait, toutefois, expliquer le fait que l'agitation autour de l'ozone fût moindre sur le vieux Continent qu'aux Etats-Unis sur une simple base sociologique propre à la communauté scientifique, ou pire, en s'en tenant à la personnalité et à la formation de son expert le plus influent. L'explication n'est pas non plus à trouver dans un abandon de la théorie de la destruction de l'ozone par les SST, qui ne fut jamais effectif. Ni, fondamentalement, dans les caractéristiques techniques du Concorde (même s'il est exact que le moteur du Concorde était plus petit que celui du prototype Boeing SST, et qu'il volait plus bas ; il devait par conséquent avoir des impacts moindres sur la couche d'ozone et le climat). En effet, l'acceptabilité sociale du Concorde tint surtout au soutien indéfectible des élites politiques franco-britanniques (et, peut-être, parallèlement, à la faiblesse des

[387] Nicolet, toutefois, ne condamna nullement cette nouvelle tradition. Cette nouvelle génération faisait référence à ses travaux. En retour, Nicolet fit, dès le début, référence aux travaux du chimiste Harold Johnston, par exemple. Dans son article de 1972, Nicolet cite l'article de Johnston de 1971, paru dans *Science* [Nicolet, 1972, p. 1700]. Nicolet scelle ainsi, à son tour, le sort des aéronomes, traditionnellement physiciens, et celui des chimistes, dont les travaux s'étaient pourtant cantonnés jusqu'à la fin des années 1960 à l'étude de phénomènes troposphériques. Certes, des travaux de chimistes de la troposphère, et surtout de chimistes de laboratoire (qui quantifient notamment les constantes de réaction chimique), tels que ceux que Nicolet cite en 1972 (Ex : « JOHNSTON, H. (1968). Gas phase reaction kinetics of neutral oxygen species. *Nat. Standard Refi Data* » ; « JOHNSTON, H.S. and CROSSBY, H.J. (1954). Kinetics of the fast gas phase reaction between ozone and nitric oxide. *J. them. Phys. 22, 689* ») ; « LEIGHTON, P.A. (1961) *Photochemistry of air pollution.* Academic Press, New York » [Nicolet, 1972, p. 1700]), avaient déjà servi à initier une aéronomie chimique complexe dans les années 1960 (voir Chapitre 3). Mais, jamais les deux communautés ne s'étaient auparavant attaquées *aux mêmes phénomènes atmosphériques*. Ils n'avaient donc, dans le même temps, que rarement fréquenté les mêmes séminaires et publié dans les mêmes journaux.

Par ailleurs, la circonspection de Nicolet au sujet des risques environnementaux n'implique nullement que le travail de Nicolet n'eût aucun écho dans le champ pratique de l'expertise pour le politique. Ce fut même tout l'inverse, puisque l'ouvrage de Nicolet de 1978, qui comptait plus de cinq cents pages, sera le manuel des chercheurs des années à venir. La synthèse théorique de l'ozone forme la pierre angulaire du formalisme chimique des rapports d'experts onusiens de la fin des années 1970 et du début des années 1980 (au moins jusqu'au grand rapport en trois volumes de 1985 intitulé "Atmospheric Ozone: Assessment of our Understanding of the Processes Controlling its Present Distribution and Change" (*UNEP/WMO/*…, 1985)), me confiait une spécialiste française de l'ozone stratosphérique au LATMOS, Sophie Godin-Beekmann [Godin-Beekmann, 2011]. Dès l'article de 1970, de fait, tous les articles des chimistes Harrison, Johnston, ou autres Molina et Rowland construiront la légitimité de leurs travaux en faisant systématiquement, et même prioritairement, référence aux travaux des aéronomes reconnus : Nicolet, Bates, Crutzen, *etc.*

environnementalistes français et britanniques). Et au fait que le Concorde fût bientôt l'unique avion supersonique à voler, et en petit nombre de surcroît (il n'était pas aussi rentable que prévu). Or, de l'avis des scientifiques, seule une flotte importante d'avions pouvait causer des troubles atmosphériques.

Le 29 novembre 1962, les gouvernements britannique et français avaient conclu un accord pour la construction d'un avion de transport supersonique civil, le Concorde. Au cours des années 1960, sa rentabilité fut certes sujette à débat,[388] et le problème des 'sonic booms', également.[389] Enfin, la sécurité de ses vols. Mais, les intérêts économiques (l'innovation industrielle générée, notamment), diplomatiques et de prestige national l'emportent. Le Royaume-Uni envisage d'intégrer la CEE (ce qu'elle fera en 1973). La France de De Gaulle, "souverainiste", se tient droit dans ses bottes. Les Etats-Unis, parallèlement, maintiennent leur programme SST, eux aussi pour des raisons de prestige national tout autant que pour injecter des liquidités dans leur secteur industriel national. Comme le formule Joshua Howe, le Concorde comme les SST américains sont des « avions politiques », qui portent en eux un ensemble d'hypothèses sur le rôle du développement technologique dans la politique étrangère et la stabilité économique nationale. [George, 1975 ; Goodhart, 1974 ; Touscoz, 1965 ; Conway, 2005, chapters 4 & 5 ; Wilson, 1973 ; Owen, 1997 ; Howe, 2010, p. 71]

Dans un second temps, au tournant des années 1970, le programme Concorde voit la reddition de ses deux concurrents. Des Etats-Unis, en 1971. Puis, des Soviétiques. Le 3 juin 1973, trois ans avant la mise en service du Concorde, son concurrent soviétique, le Tupolev Tu-144, s'écrase en France, lors d'une démonstration au Salon du Bourget, détruisant une quinzaine de maisons, et tuant six membres d'équipage et huit personnes au sol. Le 'Concordski', comme l'appellent avec condescendance les médias occidentaux, qui a pourtant d'abord été pensé comme un avion de ligne, servira finalement uniquement pour le fret et le courrier (à l'exception des 55 vols réguliers de l'année 1978, dont l'un subit, le

[388] Dans un article "Supersonic Adventure", publié en 1965 dans 1965 *Bulletin of the Atomic Scientists*, le consultant en aéronautique Bo Lundberg mettait en garde : le Concorde servirait un marché « épouvantablement petit », alors que très coûteux (40 millions de dollars par avion, et une consommation de carburant par passager 3 à 4 fois supérieure par rapport à un avion de ligne standard). Il risquait de se faire rapidement désavouer par ses financeurs. Dieu merci, les financeurs étaient des Etats. Aux Etats-Unis, le pessimisme de Lundberg était plus volontiers partagé qu'en Europe. Mais, Lundberg ne témoignera toutefois pas devant le Congrès des Etats-Unis avant décembre 1972. Dans les années 1960, l'enthousiasme était plus technologique qu'économique. Comme l'a montré Erik Conway dans *High Speed Dreams: NASA and the Technopolitics of Supersonic Transportation, 1945-1999* (2005), il existait une faible demande pour ces nouveaux avions en dehors de l'industrie pouvant les construire, et dès 1968, même Boeing voyait le projet plus comme une aventure technologique que comme un chemin vers un avion viable économiquement. [Howe, 2010, pp. 70-71 ; Conway, 2005, chapters 4 & 5]

[389] Au sujet des 'sonic booms', les spécialistes du droit international Kiss et Lambrechts font remarquer que, à la fin des années 1960, « de toute manière, l'interdiction du survol des territoires habités à des vitesses supersoniques avait déjà été envisagée dans les milieux de l'aéronautique civile comme une mesure d'apaisement propre à faire graduellement accepter le S.S.T. » [Kiss & Lambrechts, 1970, p. 769]

23 mai 1978, une panne en vol qui causa la mort de deux des huit membres d'équipage). Par ailleurs, l'arrêt du programme SST états-unien en 1971 a semé le doute au sein des compagnies aériennes. En 1973, les commandes de Concorde sont annulées par 'Japan Air Lines', 'Pam Am', 'Quantas' et 'TWA' [Andersen & Sarma, 2002, p. 7]. Economiquement, les Français et les Britanniques accusent le coup. Mais, l'autre corollaire est la presque disparition de la menace environnementaliste : la poignée de Concorde qui volera – seuls seize Concorde seront finalement construits – sera vraisemblablement bénigne pour la couche d'ozone et le climat global, jugera-t-on.[390]

En définitive, comme dans toute controverse sociotechnique, l'affaire Concorde est un imbroglio de science, de politique, d'économie, *etc.*, avec les formes multiples de 'story-telling' qui vont avec.[391] En 2011, Sophie Godin-Beekmann,[392] chercheur au LATMOS (qui a

[390] De plus, au cours des années 1970, relève Jean-Pierre Pommereau, « la révision du coefficient d'une réaction photochimique importante dans le mécanisme de destruction d'ozone réduira encore la menace à moins [de] 1 % en colonne totale d'ozone pour 500 appareils » [Pommereau, 2008 **in** Chanin, 2008, pp. 258-259]. Mais, la capacité de nuisance des SST est toujours jugée plausible par la communauté au milieu des années 1970 (et le demeure aujourd'hui).

Notons que le rapport exécutif du CIAP de 1975 est toutefois équivoque. D'abord, tout en concluant qu'une flotte de 500 Boeing 2707 SST détruirait l'ozone de manière importante (à hauteur de 12% environ), le 'Department of Transportation' (DoT) recommande le droit au Concorde d'atterrir aux Etats-Unis (droit qui sera accordé finalement en 1977 – le bruit du Concorde (les 'sonic booms'), plus que la question de l'ozone, retarda la fin de l'interdiction). Dans une lettre à *Science*, le Président de la Section 'Solar Planetary Radiations' de l'American Geophysical Union, Thomas Donahue, dénoncera l'attitude du DoT (Thomas M. Donahue and Alan J. Grobecker, "The SST and Ozone Depletion," *Science*, vol. 187, no. 4182 (March 28, 1975): 1142) [Howe, 2010, p. 186]. Stephen Schneider le fera également, pour une autre raison. Dans *the Genesis Strategy* : *Climate and Global Survival* (1976, avec Lynn E. Mesirow), il explique pourquoi le rapport du CIAP, tel que présenté par les médias, fut préjudiciable aux "environnementalistes". C'était vrai pour les conclusions concernant les CFC (voir Chapitre 5), mais également pour les SST. Une confusion, explique le climatologue du NCAR, avait eu lieu. Les inquiétudes au sujet du Boeing SST états-unien étaient largement justifiées dans le rapport. Mais le DoT, qui escomptait assurer un espace aérien et des pistes d'atterrissage au Concorde, mit l'accent sur le Concorde, non les Boeing. Or, le moteur du Concorde était plus petit, et il volait plus bas, aussi avait-il un effet moindre sur l'atmosphère et le climat [Schneider, 1976 **in** Howe, 2010, p. 187]. Enfin, Harold Johnston, farouche opposant aux SST du début à la fin, dénoncera l'intention délibérée des auteurs de l'executive summary' du rapport du CIAP de 1975 de tromper le lecteur, en lui laissant croire que les scientifiques du CIAP avaient blanchi, ou presque, les SST. En 1989, dans un contexte d'intérêt retrouvé pour l'aviation supersonique civile aux Etats-Unis, Johnston publiera encore un article sur les SST avec son étudiant Doug Kinnison et Donald Wuebbles dans *J. Geophys. Res.* lls estimeront que, en prenant en compte la technologie et les savoirs scientifiques les plus récents, 500 avions supersoniques civils provoqueraient une destruction moyenne globale d'ozone de 19% [Johnston, 1975, témoignage devant le Congrès **in** Howe, 2010, p. 185 ; Johnston, 1992, pp. 29-30].

[391] L'incipit de *Nous n'avons jamais été modernes* de Bruno Latour débute par la définition de la destruction anthropique de l'ozone (en fait, plus précisément, du « trou de la couche d'ozone »), comme objet « hybride », comme « imbroglio de… ». Cet objet phare de la chimie atmosphérique est en effet hybride, en ceci qu'il s'est construit et continue à évoluer dans un univers composé de « chimistes de la haute atmosphère », de « chefs d'Etat des grands pays industrialisés », d'« industriels », de météorologues qui ne seraient plus d'accord avec lesdits chimistes, de représentants des « pays du tiers monde », d'« écologistes » ; il est hybride en cela qu'il est un imbroglio « de science, de politique, d'économie, de droit, de religion, de technique, de fiction » ; il est hybride en tant qu'il mélange « le ciel et la terre, le global et le local, l'humain et le [non-humain] » ; il est hybride car s'exprime par lui indissociablement « la connaissance » scientifique et le pouvoir « politique », c'est-à-dire ce que l'on appelle communément la « nature » et la « culture ». [Latour Bruno, 1991, *Nous n'avons jamais été modernes – essai d'anthropologie symétrique*, La Découverte, Paris, pp. 7-16].

[392] En 1984, Sophie Godin avait obtenu un DEA de géophysique externe. En 1987, elle soutenait sa thèse d'Etat à Paris, intitulée « Etude expérimentale par télédétection laser et modélisation de la distribution verticale d'ozone dans

phagocyté le SA en 2008), nous expliquait en ces termes le hiatus patent qui s'était produit entre ses ainés français et leurs "homologues" états-uniens dans les années 1970 :

> « En France, [malgré] les premières controverses dans les années 1970 [sur] le Concorde [..., la question de la destruction anthropique de l'ozone par les avions supersoniques] était seulement discutée dans les cercles de spécialistes. [...] Je pense qu'en France [la situation était] différent[e des Etats-Unis] parce que... la discussion aux Etats-Unis était orientée... En France, on avait fait cet avion et on voulait qu'il vole. » [Godin-Beekmann, 2011]

En effet, de grandes firmes françaises et britanniques, ainsi que leurs gouvernements, voulaient encore et toujours que le Concorde volât. Or, la reddition, l'une après l'autre, des autres concurrents-pollueurs, leur permit d'accomplir leur vœu sans que les condamnations venues de l'étranger soient trop virulentes. Mis en service en 1976, le Concorde volera jusqu'en 2003.

Quid, par ailleurs, des CFC ? A la fin des années 1970, sous la pression des grands producteurs et consommateurs de CFC nationaux, réunis entre autres dans l'internationale 'Manufacturing Chemists Association' (Amérique du Nord, Europe, Japon et Australie), les gouvernements des grandes puissances industrielles européennes ne souhaitent pas emboîter le pas de leurs voisins scandinaves et des Etats-Unis. Malgré la pression des Etats-Unis, la CEE refuse de bannir les bombes aérosols à la fin des années 1970. Puis, rapporte la sociologue états-unienne Karen Litfin, les Britanniques et les Français demeureront « les plus résistants » au cours des négociations du Protocole de Montréal (1985-87) (voir Chapitre 7) [*Science News* (1), 1974, p. 212 ; Jachtenfuchs, 1990 **in** Litfin, 1994, Chapter 3, p. 10]… Outre la pression des industriels, et le fait que l'expertise scientifique soit presque exclusivement produite aux Etats-Unis, peut-être aussi le fait que les Européens n'eussent pas connu d'antécédent politique de gouvernance de l'ozone (puisqu'ils avaient poursuivi leur programme Concorde) joua de manière décisive dans le manque de mobilisation de la communauté scientifique, de la société civile et des politiques, entre 1974, date de l'alerte aux CFC, et les négociations au Protocole de Montréal. Nous précisons que ce manque de mobilisation était propre aux pays ouest-européens ; la situation était toute différente dans le nord de l'Europe, nous l'avons dit, puisque les CFC y avaient été très rapidement réglementés.

Les atermoiements des gouvernements des grandes puissances économiques européennes en matière de protection de la couche d'ozone ne signifient pas que les Européens traînaient des pieds pour faire de la recherche sur l'ozone. Appeler à "la nécessité

---

la haute stratosphère ». Gérard Mégie était son directeur de thèse ; Marcel Nicolet était membre du jury de soutenance [Godin-Beekmann, 2010]. Sophie Godin-Beekmann sera Vice-Présidente (2004-2008) puis Secrétaire (2008-2012) de l'IO3C. Elle est en outre, "accessoirement", rappelons-le, la co-directrice de cette présente thèse.

de plus de science sur un problème environnemental" (pour avoir plus de certitudes, pour réduire les incertitudes) n'implique nullement que l'on souhaite être proactifs pour résoudre ce problème environnemental (le cas des Etats-Unis, qui ont à ce jour dépensé des milliards de dollars sur le changement climatique, depuis leur premier Programme national sur le Climat de 1978, sans jamais s'être fixés d'objectif précis de réduction de GES, est un cas d'école). Et surtout, dans les années 1970, il est possible que les pouvoirs publics de la RFA, du Royaume-Uni et de la France pensaient qu'effectuer des recherches nationales pourrait leur donner des arguments scientifiques afin de résister à d'éventuelles pressions des Etats-Unis les sommant de réglementer leur production et leur consommation de CFC.[393]

Quoiqu'il en soit, dans le cas français, la DGRST (Délégation Générale à la Recherche Scientifique et Technique ; 1958-…) lança en 1976 trois ACC (Action Complémentaire Coordonnée, l'un des moyens mis à la disposition de la DGRST pour inciter les chercheurs à travailler sur des sujets prioritaires qui, à un moment donné, ont été insuffisamment pris en compte par les structures en place) : l'une sur « la physique de l'atmosphère » ; l'autre sur « le cycle du carbone » ; la dernière, enfin, sur « la physico-chimie de la stratosphère » (PCS). L'ACC PCS, qui se déroula sur sept ans (1976-83 ; non reconduite après 1982-1983), permit de prolonger les travaux initiés par COVOS (on peut voir l'ACC PCS comme une sorte de relai du programme COVOS de l'Académie des Sciences, qui s'achevait en 1976), pour financer des travaux sur la stratosphère au Service d'Aéronomie et au LMD (Laboratoire de Météorologie Dynamique, créé à l'initiative de Pierre Morel, du CNES, en 1968). Le développement de mesures stratosphériques (par lidar, notamment), le grand facteur d'intégration des chercheurs français dans la communauté internationale de l'ozone dans les années 1980, sera tributaire de cette ACC décidée par la DGRST en 1976… Même si les budgets resteront faibles (1,2 millions de francs en 1976, 2 millions en 1977 puis 1978).

Malgré cet effort scientifique français, et ceux, concomitants, du "partenaire Concorde" Royaume-Uni et du voisin RFA, la recherche sur la destruction anthropique de l'ozone demeure embryonnaire en Europe à la fin des années 1980. La modélisation numérique de la chimie stratosphérique au SA, et donc plus généralement sur le sol français, ne débutera véritablement qu'à la fin des années 1980, notamment sous l'impulsion de Gérard Mégie, et

[393] C'est en tout cas une *hypothèse*, *pour la France*, de Morgan Jouvenet [*Cf.* sa présentation au Séminaire « Changement climatique et biosphère : expertise, futurs et politiques » du Centre A. Koyré, le 10 février 2014, intitulée « Le soutien politique aux sciences de l'atmosphère. Une étude de cas »]. Morgan Jouvenet poursuit actuellement ses recherches, qui viendront confirmer, ou non, que le souci de développement de la science stratosphérique obéissait en partie, *pour les pouvoirs publics (la DGRST, notamment)*, à un souci de résistance (la défense de l'industrie française, en somme), dans les années 1970 – notamment, contre les Etats-Unis.

La suite de notre paragraphe est bâtie à partir des travaux en cours de Morgane Jouvenet (toujours d'après sa présentation du 10 février 2014). Qu'il soit remercié d'être venu présenter ses résultats au Centre Alexandre Koyré.

avec le travail d'H. Le Texier, qui venait de collaborer avec Susan Solomon au NCAR sur le transport et la chimie des composés hydrogénés dans la stratosphère et la mésosphère à l'aide d'un modèle bi-dimensionnel [Chanin, 2008, pp. 453-471, 258, 229]. Ceci correspondra à un changement d'attitude des scientifiques et des politiques européens, nécessairement multifactoriel,[394] et sans commune mesure avec celui post-1985 (voir Chapitre 7). Dans les années 1980, et en particulier jusqu'en 1985, le constat demeure : les Etats-Unis sont l'Olympe de la science de l'ozone.

6.2. Les prémices d'une science du Système Terre. L'exemple de la NASA

Comme nous l'avons montrée dans le Chapitre 2, dans les années 1940-50, de nombreux *physiciens-astronomes* sont débauchés de leurs travaux d'astronomie et géophysique fondamentale pour alimenter l'arsenal technologique et cognitif de leur Etat en guerre. Ils deviennent « physiciens », « logiciens » ou « mathématiciens » dans les secteurs de la balistique et des missiles, de la navigation, de la physique optique, de la physique nucléaire, de la reconnaissance sous-marine, de l'électronique, mais également, en grand nombre, dans le domaine de la *météorologie*, dans la mesure où le travail dans les observatoires astronomiques consiste déjà en partie à scruter l'atmosphère. Aussi bien la nature des

[394] Relevons comme facteurs principaux de ce basculement du milieu des années 1980 : l'attitude plus active de la CEE, à partir de 1980 (en mars 1980, le Conseil de l'Europe avait demandé à ses Etats-membres de limiter leur capacité de production industrielle de CFC et de réduire de 30% leurs productions d'aérosol avant la fin de l'année 1981) ; des estimations de destruction de l'ozone données à la hausse par des institutions reconnues, en 1983-84, et l'annonce du "trou de la couche d'ozone" en 1985 ; le 'leadership' des puissants Etats-Unis dans la science de l'ozone présentée au cours des réunions internationales onusiennes sur l'ozone (voir Chapitre 7). Au SA, ce tournant de 1984-1985 correspond au "passage de témoin" de Jacques Blamont à Gérard Mégie, l'un des premiers spécialistes de la question de la destruction anthropique de l'ozone en France, qui va devenir au SA le directeur de thèse ayant le plus d'étudiants sous sa responsabilité entre 1984 et 1991 (*cf.* les thèses de doctorat soutenues entre 1987 et 1991). [Chanin (Dir.), 2008, pp. 453-471]

Sophie Godin-Beekmann, qui effectua comme travail de thèse entre 1984 et 1987 une « Etude expérimentale par télédétection laser et modélisation de la distribution verticale d'ozone dans la haute atmosphère (Dir. : G. Mégie) » soulignera que, de plus (et comme nous le montrerons dans le Chapitre 7), la question de l'ozone avait pris une nouvelle dimension, entre le début et la fin de sa thèse – quantitativement, par le nombre de chercheurs, et qualitativement, par le catastrophisme des alertes :

> « Entre temps, il y a eu la déferlante de l'article de Farman dans *Nature* [(1985) considéré comme l'annonce du "trou dans la couche d'ozone antarctique"], et donc les choses avaient changé… En 1987, c'était très balbutiant, tous ces systèmes lidars [*i.e.* la télédétection par laser, sur laquelle je travaillais]… C'étaient les scientifiques qui faisaient tout dans les systèmes [(*i.e.* toute l'élaboration des instruments)]… Cette toute petite communauté se réunit par exemple à la 'Conférence lidar' de Toronto en 1986 : mesures de température, d'ozone, de vent… Puis, je suis allée à Vancouver [pour la conférence de] l'IUGG en 1987 […]. J'ai assisté notamment à un papier de Crutzen, qui était très alarmiste sur l'ozone. » [Godin-Beekmann, 2011]

Pour une histoire plus détaillée du programme français du SA sur la destruction de l'ozone, nous renvoyons au chapitre « Chimie de la stratosphère et destruction de l'ozone » de Jean-Pierre Pommereau et ses collègues **in** Chanin (Ed.), 2008, pp. 258-276. Sur la modélisation de la chimie troposphérique, stratosphérique et des atmosphères planétaires au SA, lire le chapitre « Modélisation numérique des atmosphères terrestres et planétaires » de Slimane Bekki et ses collègues **in** Chanin (Ed.), 2008, pp. 225-233.

observations de l'atmosphère depuis les observatoires que la montée des enjeux géopolitiques vers une échelle continentale voire globale (liée notamment à la portée de l'arme nucléaire) concourent à la montée en échelle de la météorologie dans les années 1950-60. La météorologie fait désormais appel aux moyens de télédétection des astronomes, et, à partir de la fin des années 1950 aux satellites (avec une réussite contrastée).

Les décennies 1940-60 sont particulièrement généreuses pour les astronomes et les météorologistes se trouvant sur le sol américain. Au cours de la Seconde Guerre mondiale, leurs sciences ont lié leur destinée à des technologies belligérantes au déploiement géographique inédit (avions, V2, essais nucléaires), qui leur promettent d'élaborer de nouveaux savoirs sur les phénomènes atmosphériques à grande échelle. Dans le même temps, ils sont passés par un processus d'apprentissage de la « machine de gouvernement » fédéral. Aussi, s'épanouissent-ils après-guerre au sein de l'alliance « gouvernement, armée, science » de la Guerre Froide (ou « complexe militaire-industriel-universitaire »), où ils peuvent développer, d'une part, une science météorologique nationale, qui allie des études sur la prévision et la modification du temps et du climat à des fins militaires et civiles (sécurisation des vols aéronautiques et aérospatiaux, des actions militaires au sol ; prévention contre les sécheresses, les tornades sur le territoire national), et d'autre part, un programme de recherche plus fondamentale sur la répartition de l'ozone dans la stratosphère ou sur les impacts climatiques globaux des gaz à effet de serre et des aérosols.

L'aéronomie et les sciences des atmosphères planétaires sont les plus grands bénéficiaires de l'augmentation des dépenses fédérales états-uniennes pour la recherche en sciences atmosphériques au cours des années 1960 (voir Figure 14 ; Chapitre 2). Avec un « goût pour les gros budgets » acquis pendant la guerre, et avec la ferme intention de rattraper le temps perdu pendant les années de guerre, écrit l'historien des technologies spatiales et de l'astronomie Joseph Tatarewicz, les astronomes états-uniens ont su tirer parti de « trois évènements » : « le développement des radars » et autres technologies d'ondes pour la surveillance militaire (et de la science des missiles pour la défense) ; « l'accroissement du personnel scientifique après la guerre » ; et le sentiment national de retard éprouvé au lendemain du « lancement de Spoutnik ». [Tatarewicz, 1990, pp. 6-7 ; Dahan & Pestre (Dir.), 2004 ; Conway, 2008]

Les scientifiques des atmosphères planétaires américains voient ainsi leur budget augmenter de manière spectaculaire dans la course à l'espace avec l'URSS.[395] Ils joueront un

[395] Si elles n'ont pas attendu la conquête spatiale pour se développer, les sciences des atmosphères planétaires connaissent par contre un essor sans précédent au cours des décennies 1950-60, en particulier après la mise sur orbite réussie de Spoutnik 1, le 4 octobre 1957, qui sonne le branle-bas de combat des agences fédérales scientifiques états-uniennes pour la course à l'espace. Il s'incarne par la création du 'House Committee on Science and Technology', le lancement du premier satellite américain Explorer-1 (1958), œuvre entre autres de

rôle important dans la théorisation de l'atmosphère globale terrestre dès les premières années qui suivront la création de la NASA en 1958 (dès les débuts, l'étude théorique de l'atmosphère fait partie des prérogatives de la NASA). Mais, ce rôle s'amplifiera dans les années 1970, à la faveur de la "reconversion environnementaliste" de l'agence spatiale suite à l'alerte à la destruction anthropique de l'ozone. A la fin des années 1970, la NASA a acquis le rôle d'institution de référence sur la *chimie stratosphérique* aux Etats-Unis, donc également dans le monde (Première Section). Plus généralement, elle est également devenue l'une des trois places fortes de la recherche sur l'atmosphère globale, aux côtés du NCAR et de la NOAA. Positionnée sur les questions de *changement climatique* (Quatrième Section) et des *cycles biogéochimiques globaux* (Troisième Section), elle est particulièrement en vue pour ses recherches, sur la *chimie troposphérique à grande échelle et globale* (Deuxième Section).

La "conversion environnementale" de la NASA, qui succède au CIAP comme organe référent de la science sur l'ozone aux Etats-Unis (1976)

Notre choix d'institution scientifique n'implique *pas* que la NASA fût l'acteur *hégémonique* de la science de l'ozone. Ce n'est pas vrai après 1985, même si la NASA sera le responsable de "l'ostension" des images de trous de la couche d'ozone, et sera l'institution la plus

---

Wernher von Braun (développeur du V2 dans l'armée du Troisième Reich), et la signature de la loi instituant la National Aeronautics and Space Administration (NASA) par le président Eisenhower (1958)… [Tatarewicz, 1990, pp. 6-7]

Pendant une dizaine d'années, le champ d'études comparées des atmosphères planétaires connait une dynamique spectaculaire, dont atteste la publication d'ouvrages de l'état-de-l'art du champ, des revues (*Planetary and space science* (1959-…) ; *Earth and planetary science letters* (1966-…) ; *Icarus* (1962-…)), la tenue de nombreux colloques (organisés principalement aux Etats-Unis), et l'« avant-propos » du premier numéro de *Planetary and space science*, signé par le radioastronome britannique A.C. Bernard Lovell en 1959 :

> "The launching of the first Sputnik in October 1957 marked one of the greatest scientific and technological achievements of man. By providing astronomers and physicists with a means of carrying their instruments away from our earthbound environment it opened a new epoch in scientific investigations. […] Improved astronomical techniques, rockets and radio astronomy have already increased our knowledge of our immediate environment in space to an extent which would have been unimaginable a few years ago." [Lovell, 1959]

Les instruments embarqués à bord des satellites artificiels permettent une observation spatiale libérée du "filtre spectral" constitué par l'air terrestre… Ces instruments avaient déjà pour certains une histoire (au sol) longue de plusieurs décennies : spectromètres, radiomètres, caméras, appareils photographiques, interféromètres.

Dans les années 1960-70, l'afflux de budgets pour la *Big Science* spatiale sera considérable. **L**es Etats-Unis et l'URSS lancent les premières sondes vers la Lune et vers des planètes voisines de la Terre (les programmes américains *Mariner* et *Viking* à destination de Mercure, Venus et Mars, et de Mars, respectivement ; le programme soviétique Venera à destination de Venus). La course à l'espace est alors vue par les gouvernements nationaux comme un enjeu militaire incontournable. La planétologie comparée connait alors la plus importante expansion de son histoire. [Tatarewicz, 1990]

Les cinq 'Arizona Conferences on Planetary Atmospheres', qui se déroulent entre 1967 et 1970, succédant aux 'workshops' organisés les années précédentes au Lowell Observatory (Flagstaff, Arizona), font le bilan d'une décennie exceptionnelle pour les sciences des atmosphères planétaires. Elles sont organisées par le 'Planetary Sciences Division' du 'Kitt Peak National Observatory' (KPNO) de Tucson (Arizona), qui compte dans ses rangs une douzaine de professionnels (J. W. Chamberlain, M. J. S. Belton, J. C. Brandt, D. M. Hunten, Michael McElroy, Darrell Strobel, Lloyd Wallace, *etc.*), auxquels se joignent régulièrement l'équipe et les étudiants du 'Kuiper's Lunar and Planetary Laboratory', implanté de l'autre côté de la rue sur le campus de l'University of Arizona, ainsi que Richard Goody, qui s'est tourné vers la physico-chimie des atmosphères planétaires. En effet, si de nombreux astronomes se sont mis à étudier l'atmosphère terrestre *per se*, en retour, les sciences des atmosphères planétaires ont attiré des géophysiciens, et des météorologistes tels que Richard Goody. [Cruikshank & Chamberlain, 1999].

représentée (en nombre à peine supérieur à la NOAA) dans les rapports internationaux sur l'ozone soutenus par l'ONU, les 'Ozone Assessments' (1989-…) (voir Chapitre 7). On ne saurait non plus parler d'hégémonie entre 1976 et 1985. Par contre, la NASA est incontestablement, aux côtés de la NOAA, *l'un des deux principaux* contributeurs de la science de l'ozone, entre la fin des années 1970 et la fin de la décennie suivante (et au-delà). Une conjonction de plusieurs facteurs l'avait amenée à réorienter sa politique de recherche, en direction notamment de la chimie atmosphérique, dont la chimie de l'ozone.

Avant même que Reagan ne mène sa politique de restriction budgétaire dans les années 1980, la NASA doit faire face à la baisse de prestige et d'utilité de son programme spatial, dans un contexte de Détente puis de crise économique. Au milieu des années 1970, l'agence fédérale se met activement en quête de nouvelles activités de recherches, aptes à capter des budgets fédéraux de manière durable. La montée de la thématique de "l'environnement global" dans les arènes politiques internationales arrive à point nommé pour la NASA.[396] Forte de sa tradition d'étude sur les atmosphères planétaires, et de ses compétences singulières en matière de mesures et d'imagerie de la Terre depuis l'espace, la NASA lorgne sur de nouveaux financements. Toutefois, le 'National Center for Atmospheric Research' (NCAR), créé en 1960 principalement sous l'impulsion de météorologistes-modélisateurs d'élite (Rossby, Charney, Neumann, Wexler) et d'océanographes d'élite (Revelle) désireux de travailler sous financements civils et sur des questions fondamentales,[397] s'était déjà positionné comme chef de file des études sur le climat global et ses changements. De plus, au milieu des années 1970, les perspectives de financements pour la recherche climatique demeurent faibles (la situation n'évoluera significativement qu'en 1978, avec le vote en faveur de la création d'un 'US National Climate Program Act'). Reste la question de la destruction anthropique de l'ozone.

Comme nous l'avons expliqué plus haut, dès 1972, des chercheurs ont publié des travaux spécifiques sur la destruction de l'ozone stratosphérique par les gaz d'échappement des navettes spatiales. Certains d'entre eux fréquentent les chercheurs de la NASA. Ainsi, Richard Stolarski est 'Visiting Scientist' au 'Johnson Space Center' de la NASA en 1972-73.

[396] Sur la « transition » de la NASA vers des questions d'environnement global, voir le travail de l'historien de la NASA Erik Conway, notamment Conway, 2008, Chapitres 5-9. Conway y montre que « l'un des facteurs majeurs de transition du programme météorologique satellitaire de la NASA, d'un programme d'applications vers un programme plus scientifique, fut un changement sur la scène politique américaine : l'environnementalisme ». [Conway, 2008, p. 122]

[397] Voir sur ce point Howe, 2010, pp. 38-52 et Hart & Victor, 1993, pp. 658 & 677-678. Ces travaux soulignent en outre que, à l'époque des débuts du NCAR, la "modification intentionnelle du temps et du climat", programme central des sciences de l'atmosphère états-uniennes (et soviétiques) dans les années 1945-72, fait partie des objectifs (voir aussi sur ce point Fleming, 2010, et notre article sur la géoingénierie Briday, 2014). De plus, les premiers financements du NCAR proviennent, non seulement de la 'National Science Foundation', mais également d'institutions militaires (le 'Department of Defense' ; l'"Office of Naval Research'). [Howe, 2010, pp. 51 & 47]

Dans la foulée, il intègre l'agence. La NASA recrute là l'un de ses premiers chercheurs pour travailler spécifiquement sur l'ozone.

Ironiquement, quelques années plus tard, la NASA va tirer profit de l'accusation qui avait été lancée en 1972 en direction de "ses propres" technologies. Car, forte des premiers travaux qu'elle a entrepris au sujet de l'hypothèse d'une destruction anthropique de l'ozone par "ses" navettes spatiales,[398] la NASA va pouvoir alors briguer la succession du CIAP, dont le contrat s'achève en 1975. Elle postule, de manière officielle, dès la fin de l'année 1974.

Le CIAP avait été confié en 1971 au 'Department of Transportation' (DoT) et à la NAS. Mais, si la NAS avait accepté de prendre en charge le programme, ce n'était qu'à titre provisoire, la première vocation de l'Académie n'étant pas de produire des rapports d'expertise scientifiques (charge qui incombe prioritairement à l'EPA, en ce qui concerne la protection de l'environnement), mais d'orienter les politiques de recherche scientifique. De plus, comme nous l'avons vu, la NAS se trouve prise dans la tempête médiatique sur les CFC et les STS, qui macule son prestige. En janvier 1975, lors d'une conférence de presse, le CIAP propose un résumé de ses travaux, puis expose ses conclusions finales au cours des semaines suivantes. Le 15 septembre 1976, la NAS publie de nouveaux rapports, qui appuieront la réglementation des CFC. Entre temps, la NAS et le DoT ont refusé de prolonger le mandat que leur donnait le CIAP. [Parson, 2003, p. 28 ; Conway, 2008, pp. 133-138 ; Oreskes & Conway, 2010, p. 117][399]

L'idée de constituer un programme de médiation encadré par l''Interagency Committee on Atmospheric Sciences (ICAS ; une instance du 'Federal Council on Science and Technology (FCST)', dirigée par le Conseiller scientifique de la Maison blanche) est un temps envisagée, mais rapidement abandonnée. La partie n'est toutefois toujours pas gagnée pour la NASA. Reste un adversaire de poids : la 'National Oceanic and Atmospheric Administration'. Créée en 1970, la NOAA compte dans ses rangs des théoriciens de l'atmosphère globale – principalement sur le climat global, l'une de ses principales missions étant la contribution à la théorisation du cycle global du carbone, par le biais de l'étude des interactions océan-atmosphère.

[398] Aucune réglementation des vols de navettes spatiales ne menaça jamais la NASA, dans la mesure où le trafic des navettes spatiales et les volumes totaux de gaz qu'ils émettent sont très faibles.

[399] Bien que, en 1975, le programme CIAP soit arrivé à son terme, il aurait pu être prolongé. Toutefois, l'idée de perpétuer le CIAP (DoT/NAS) en l'état fit long feu. Le retour de la NAS aux affaires courantes ne surprend pas. En revanche, il est plus étonnant de constater que le DoT ne lutta pas pour sa propre succession. Il prétexta que la tâche qui lui avait été confiée avait été accomplie. Mais, la raison est plutôt à chercher du côté de l'imbroglio médiatique autour de la présentation de l''executive summary' du CIAP à la presse en janvier 1975. Il avait entaché la réputation du CIAP et de ses membres dans l'arène médiatique et politique. L'heure était venue de faire peau neuve. [Parson, 2003, p. 28 ; Lambright, 2005, pp. 7-8 ; Conway, 2008, pp. 133-138]

Le 'Deputy Associate Administrator' de la NASA, John Naugle, s'appuie alors sur Ed Todd, le 'Deputy Assistant Director for Research' de la NSF, pour convaincre le Conseiller scientifique du Président Ford. Par ailleurs, il faut emporter l'adhésion d'élus du Congrès. En janvier 1975, le Sénateur démocrate Franck Moss apporte son soutien à la NASA dans la bataille de succession au CIAP, du fait de ses « capacités uniques » (satellites, logistique).[400] La NOAA s'est lancée dans la même entreprise de 'lobbying', mais c'est la NASA qui l'emporte. En juin 1975, le Congrès vote un texte qui fait de la NASA l'agence motrice « pour conduire un programme complet de recherche, de technologie et de surveillance des phénomènes de la haute atmosphère », dont la destruction de la couche d'ozone. D'après l'Historien de la NASA Henry Lambright, le support du Congrès à la NASA s'explique notamment par le fait que la NASA pourrait œuvrer comme une agence plus « indépendante » que la NOAA, qui était « subordonnée » au 'Department of Commerce' (DoC) [Naugle John, 1975, "S.851. Cited in Congressional Record-Senate (26 February 1975), S2641" **in** Lambright, 2005, pp. 7 & 50]…[401] Trois ans plus tard, pourtant, en 1978, le Congrès nommera la NOAA comme agence fédérale de référence sur le changement climatique, par le biais du vote du 'National Climate Act' par le Congrès. Un 'National Climate Program Office' sera créé à la NOAA. Mais, précisons par ailleurs que le 'Department of Energy' (DoE) avait également obtenu, dès sa création en 1978, un financement massif pour faire travailler des 'National Laboratories' sur le CO_2, et que le NCAR demeurait alors et demeure jusqu'à nos jours un acteur incontournable de la science climatique. [Lambright, 2005, pp. 7-8 & 11]

---

[400] L'historien de la NASA Henry Lambright rapporte que, en janvier 1975, devant le Congrès des Etats-Unis, le Sénateur démocrate Franck Moss résume ainsi le constat général sur les sciences de l'ozone dressé par le Comité du Sénat sur les Sciences aéronautiques et spatiales un mois plus tôt :

> « 1) Les projections théoriques [montrent] que le monde fait face à un problème réel, mais il existe peu de preuves expérimentales pour confirmer la théorie ;
> « 2) De manière surprenante, il y [a] peu de scientifiques travaillant dans le champ de la chimie de la haute atmosphère, peut-être « pas plus qu'une centaine dans le monde entier » ;
> « 3) « Les efforts pour comprendre ce qui se passe dans la haute atmosphère ont été [jusqu'à présent] décousus ('piecemeal') et fragmentés ('fragmented'). » »

Moss rappelle que la décision d'interdire certaines substances destructrices d'ozone dépendra de ce que les recherches sur l'ozone montreront. Puis, il apporte son soutien à la NASA dans la bataille de succession au CIAP, du fait de ses « capacités uniques ». [Moss, 1975 **in** Lambright, 2005, p. 8]

[401] Lambright souligne, en outre, la proactivité de James Fletcher, le 'NASA administrator', et le rôle d'Ed Todd, de la NSF, dans le choix final de la NASA :

> "Todd went on to say that NOAA had done some lobbying. NOAA had given Stever a copy of a letter it sent Congress, which stated NOAA's willingness to take "responsibility to act as lead agency." Todd did not believe his agency, NSF, was appropriate to serve as the lead. Rather, he stated his view that it was NASA or NOAA that should be the lead. Naugle made it clear that NASA "was definitely interested in being the lead agency. […]
>
> "Fletcher had redistributed existing funds to set up an office. Fletcher and Deputy Administrator George Low now forcefully pursued the agency leadership position, using the office Fletcher established as what one study called a "lever." It was a way of showing that NASA was already organized to conduct an activity. To the extent there was competition between NASA and NOAA for this new program, NASA had the clear advantage in congressional support and in the freedom to maneuver as an independent agency (versus NOAA's subordinate location in the Department of Commerce)." [Lambright, 2005, pp. 7-8]

En 1976, la NASA devient donc en droit l'agence de référence d'expertise sur l'ozone stratosphérique. En 1976, le Congrès accorde à la NASA de mener le programme national de recherche sur l'ozone stratosphérique. Cet 'Upper Atmospheric Research Program' (UARP) sera d'abord dirigé par Ron Greenwood. Le budget de l'UARO ('Upper Statospheric Research Office') de la NASA passe de 7,5 à 11,6 millions de dollars dès 1977. Il continuera d'augmenter dans les années qui suivront. En 1978, la NASA lance Nimbus 7, un satellite équipé de cinq instruments de mesure atmosphérique, dont les dispositifs SBUV ('Solar Backscatter UltraViolet', lancés par la NASA et la NOAA depuis 1970 ; remplacés par SBUV/2 à partir de 1984) et TOMS ('Total Ozone Mapping Spectrometer', principalement développé par la NASA, que les satellites de cette dernière mettent en orbite pour la première fois en 1978 à l'aide de Nimbus 7). Dans les années 1980, SBUV et TOMS seront les uniques sources de données depuis l'espace utiles pour la science de l'ozone proposées par la NASA [Lambright, 2005, p. 9].

Dès la fin des années 1970, la NASA contrôle approximativement 70% de l'argent du gouvernement fédéral consacré à la recherche sur l'ozone. Représentée par son 'Deputy Associate Administrator' John Naugle, la NASA a obtenu, comme elle l'avait sollicité, un programme de recherche stratosphérique « sans limite définie de perspective ni de temps » (par opposition au CIAP) [Lambright, 2005, p. 9 ; Naugle, 1975]. Le chimiste anglais Robert Watson rejoint dès 1976 le 'Jet Propulsion Laboratory' (JPL) de la NASA, laboratoire qui constituera l'un des piliers de la recherche sur l'ozone au sein de l'agence fédérale.[402] En 1980, il rejoint le siège social de la NASA à Washington, et succède à Greenwood à la tête de l'UARP, programme auquel se joindra Mario Molina en 1982, en rejoignant le JPL. (Nous revenons sur le programme d'expertise sur l'ozone stratosphérique entrepris par Robert Watson dans la première moitié des années 1980 dans le Sous-chapitre 7.1)

La chimie troposphérique à grande échelle

Outre l''Upper Atmosphere Research Program', confié à Robert Watson, la NASA lance, au cours de la même année 1980, un autre programme de recherche sur la chimie atmosphérique : *le 'Tropospheric Chemistry Program'*.[403] Dirigé par Robert « Joe » McNeal, ce

[402] Le 'Jet Propulsion Laboratory' se situe à Pasadena, en Californie. Deux autres grands sites de la NASA collaborèrent à l'effort de recherche sur la destruction de l'ozone. Richard Stolarski passa de l'un à l'autre, au milieu des années 1970 : en 1974, il avait intégré l'"Environmental Effects Project Office' du 'NASA's Johnson Space Center' (notons l'utilisation précoce du terme « environnement » à la NASA), près de Houston, qui était chargé de travailler sur les impacts environnementaux des navettes spatiales ; en 1976, Stolarski rejoignit le 'Goddard Space Flight Center', dans l'Est américain, « qui développait une nouvelle branche consacrée aux études stratosphériques. » [Stolarski, 2012, « biographie », http://eospso.gsfc.nasa.gov/ess20/docs/stolarski_bio.pdf (10/11/2012)]

[403] Sa composante de terrain se nomme 'Global Tropospheric Experiment' (GTE ; 1982-2003).
McNeal, qui voit dans la chimie atmosphérique « un champ 'limité par les mesures' » souhaite exploiter au mieux la puissance instrumentale de la NASA, qui est loin de se résumer aux satellites. La NASA « possédait des avions

second programme, de moindre importance, est mené avec une certaine proximité avec le programme sur la chimie stratosphérique.

D'abord et surtout parce que troposphère et stratosphère échangent de l'ozone.[404] Mais, sur ce point, de nombreuses questions restent en suspens. Un article de Jack Fishman et Paul Crutzen daté de 1978 ("The origin of ozone in the troposphere", *Nature*) conteste le fait que, comme le pensent la plupart des atmosphériciens de l'époque, la première source d'ozone troposphérique provienne de la stratosphère, en descendant massivement au niveau des hautes latitudes moyennes de chaque hémisphère. Les deux chercheurs du NCAR arguent que, puisqu'il y a beaucoup plus de terre dans l'Hémisphère nord, et par conséquent plus de captation d'ozone atmosphérique (car les vitesses de déposition d'ozone atmosphérique sont plus importantes au niveau des terres que des océans), on aurait dû observer un déficit d'ozone dans l'Hémisphère nord. Les mesures n'indiquent rien de tel. Il faudrait donc, d'après ces conclusions, que la production d'ozone dans l'Hémisphère nord soit plus importante que dans l'Hémisphère sud – ce que pouvait expliquer les phénomènes de production d'ozone dans les agglomérations (que les chimistes des pollutions urbaines ont mis en exergue), reconnaissent Fishman et Crutzen. En outre, même dans l'Hémisphère sud, des processus devraient de toute façon compenser l'irrémédiable déposition de l'ozone au sol. Crutzen et Fishman proposent alors un mécanisme de production d'ozone dans la troposphère (la photolyse du monoxyde de carbone), et ajoutent que des sources encore non identifiées d'oxydes d'azote, précurseurs d'ozone, pouvaient en outre exister. [Conway, 2008, p. 156]

---

dévolus à la recherche, stationnés à l'Ames Research Center en Californie, et à [la base de] 'Wallops Island' en Virginie, qui étaient relativement sous-utilisés, et étaient donc disponibles dans les premières années du programme », rapporte un autre historien de la NASA Erik Conway. McNeal lancera de nombreux programmes interinstrumentaux et d'intercomparaison entre les résultats instrumentaux. En outre, McNeal escomptait tirer le maximum du potentiel humain, « managérial » de la NASA. « Les expériences de terrain que prévit de mener [McNeal] pendant les années 1980, poursuit Conway, impliqueraient les efforts de centaines de gens de nombreuses universités et agences gouvernementales différentes, et donc la coordination représentait un défi important. De plus, un effort global impliquerait des collaborations avec d'autres gouvernements, chose que pouvait supporter la NASA, qui subvenait aux besoins d'une équipe interne en charge des affaires étrangères. » McNeal dirigera des campagnes de mesures au quatre coins de la planète : à la Barbade en 1984 (ABLE : 'Atlantic [Arctic] Boundary Layer Experiment') ; au Brésil à partir de 1985 (ABLE 2) ; *etc.* [Conway, 2008, pp. 157 & 161-167]

Pour une description du *'Tropospheric Chemistry Program'*, nous renvoyons le lecteur à Conway, 2008, pp. 156-167.

[404] Autre exemple d'échanges stratosphère-troposphère étudiés alors : les oxydes d'azotes de la stratosphère pourraient constituer une source importante d'azote radicalaire pour la haute troposphère [Logan *et al.*, 1981, p. 7224]. Afin d'obtenir un budget plus important pour son programme d'étude de chimie troposphérique, un rapport de la NASA de 1982 rappelait que la chimie troposphérique était « à la traîne par rapport à la chimie stratosphérique » :

> "NASA already has a well-conceived and productive program in stratospheric chemistry research, mandated by Congress in 1976. […] Knowledge of tropospheric chemistry lags behind stratospheric chemistry and, at this time, the need is for measurements, from aircraft, over the full tropospheric altitude range and over a range of conditions of the concentration (or flux if possible) of carbon dioxide, carbon monoxide, methane and other hydrocarbons, ozone, ammonia, chlorofluoromethanes, SOX, NOx, hydroxyl, aerosols, and other species. Laboratory and field measurement techniques need to be developed for these studies. Global measurements from space will eventually be required to provide a data base for global tropospheric models." [*NASA*, 1982, p. 9]

Autre point de rencontre de l''Upper Atmosphere Research Program' et du 'Tropospheric Chemistry Program' : les mesures d'ozone (et d'autres composés chimiques) troposphériques peuvent servir de compléments aux programmes liés au contrôle de la *qualité de l'air régional* (le 'Tropospheric Chemistry Program' devait dans un premier temps se nommer 'Air Quality Program', mais une telle appellation ne rendait pas hommage aux multiples champs d'étude que Robert « Joe » McNeal souhaitait aborder, notamment au sujet de l'atmosphère à grande échelle). De plus, la thématique des pollutions acides transfrontières, ou *pluies acides*, qui a émergé dans les années 1970 en Europe comme aux Etats-Unis, a placé la « chimie atmosphérique sous les projecteurs du grand public ». Or, « si les dégâts sont observables, écrivent Crutzen et Ehhalt en 1983, leurs causes n'ont toujours pas été établies » – soit, le cas contraire de la destruction anthropique de l'ozone stratosphérique, soulignent-ils, où la théorie causale n'est guère contestée, mais où aucune donnée n'indique encore une tendance à la destruction de la couche d'ozone [Crutzen & Ehhalt, 1983, p. 1].

Enfin, les activités humaines modifient la composition de la troposphère, soit en émettant des composés réactifs dans l'atmosphère, soit en la contaminant avec des composés peu ou pas réactifs qui s'y accumulent. Or, ces composés peuvent tout de même affecter les processus de réaction dans l'atmosphère, soit par leur simple présence en concentration importante, soit parce qu'ils modifient la météorologie et le climat. Soit, enfin, parce que les changements de composition en aérosols, gaz à effet de serre, ozone, *etc.* sont en interaction dynamique avec le climat global et/ou sur les cycles biogéochimiques globaux. (Nous y revenons dans les deux sections suivantes.) [Crutzen & Ehhalt, 1983, p. 1]

La théorie chimique de la troposphère s'étoffe significativement à partir des années 1970. De la même manière que la première chimie atmosphérique globale, celle de la stratosphère, s'était développée de manière presque totalement indépendante à la chimie atmosphérique régionale (initiée dans les années 1950 autour de la formalisation des réactions chimiques responsables du smog californien), la chimie troposphérique globale se développe dans les années 1970 essentiellement dans des univers savants différents de la chimie troposphérique régionale. Ils sont financés presque exclusivement par des institutions fédérales, et non des administrations locales.

Les formations disciplinaires de ses protagonistes ne sont pas les mêmes non plus. Là où la chimie troposphérique régionale est dominée par les chimistes et des météorologistes spécialisés dans les pollutions de l'air, la chimie troposphérique globale est stimulée, certes par quelques chimistes de formation (Jennifer Logan), mais principalement par des aéronomes (Paul Crutzen), ainsi que des physiciens des atmosphères planétaires, en

particulier de Harvard (Michael McElroy, Steven Wofsy, Michael Prather) ou de la NASA (autour de Robert McNeal). Le trait caractéristique de l'atmosphère de la Terre, par rapport aux atmosphères des autres planètes et satellites qui en possèdent une, n'est-il pas la grande complexité chimique de sa troposphère ?

En 1981, quatre chercheurs du 'Center for Earth Planetary Physics' de Harvard, J. Logan, M. McElroy, S. Wofsy et M. Prather, signent un long article intitulé "Tropospheric Chemistry: A Global Perspective" dans le *Journal of Geophysical Research*. Au contraire de l'article "Atmospheric Chemistry: Response to Human Influence" que les mêmes auteurs avaient publié trois ans plus tôt, qui mettait principalement l'accent sur la stratosphère et faisait la recension de résultats de modèles unidimensionnels seulement (Logan *et al.*, 1978), l'étude de 1981 fait état des résultats (des auteurs et d'autres modélisateurs) provenant de modèles à une, deux, voire trois dimensions, et est consacré à la seule chimie troposphérique (globale). En fait, aux yeux des quatre chercheurs américains, le passage de la chimie stratosphérique à la chimie troposphérique s'est fait "naturellement", sans modification de leur 'modus operandi' : leur modèle photochimique troposphérique est, écrivent-ils, « similaire au modèle stratosphérique » qu'ils avaient élaboré quelques années plus tôt, et les « méthodes numériques utilisées demeurent les mêmes ». [Logan *et al.*, 1978, p. 13 ; Logan *et al.*, 1981, pp. 7212]

Dans l'article de 1981, J. Logan, M. McElroy, S. Wofsy et M. Prather exposent « une photochimie de la troposphère globale, contrainte par les concentrations observées pour la vapeur d'eau, l'ozone, le monoxyde de carbone, le méthane, le monoxyde d'azote, le dioxyde d'azote et l'acide nitrique ». Ils y décrivent successivement différents schèmes de réactions chimiques troposphériques « globales », « globales » devant être entendu ici comme "jouant un rôle dans la composition chimique moyenne (de la troposphère)". Ils passent en revue « les réactions chimiques majeures affectant l'hydrogène radicalaire (OH, H, HO_2, H_2O_2) » et « l'oxygène radicalaire (O_3, $O(^3P)$, $O(^1D)$, NO_2) », ou encore « l'oxydation du méthane » (voir ci-dessous les Figures 32 (a), 32 (b) et 32 (c), respectivement). [Logan *et al.*, 1981, pp. 7212 & 7245-7248]

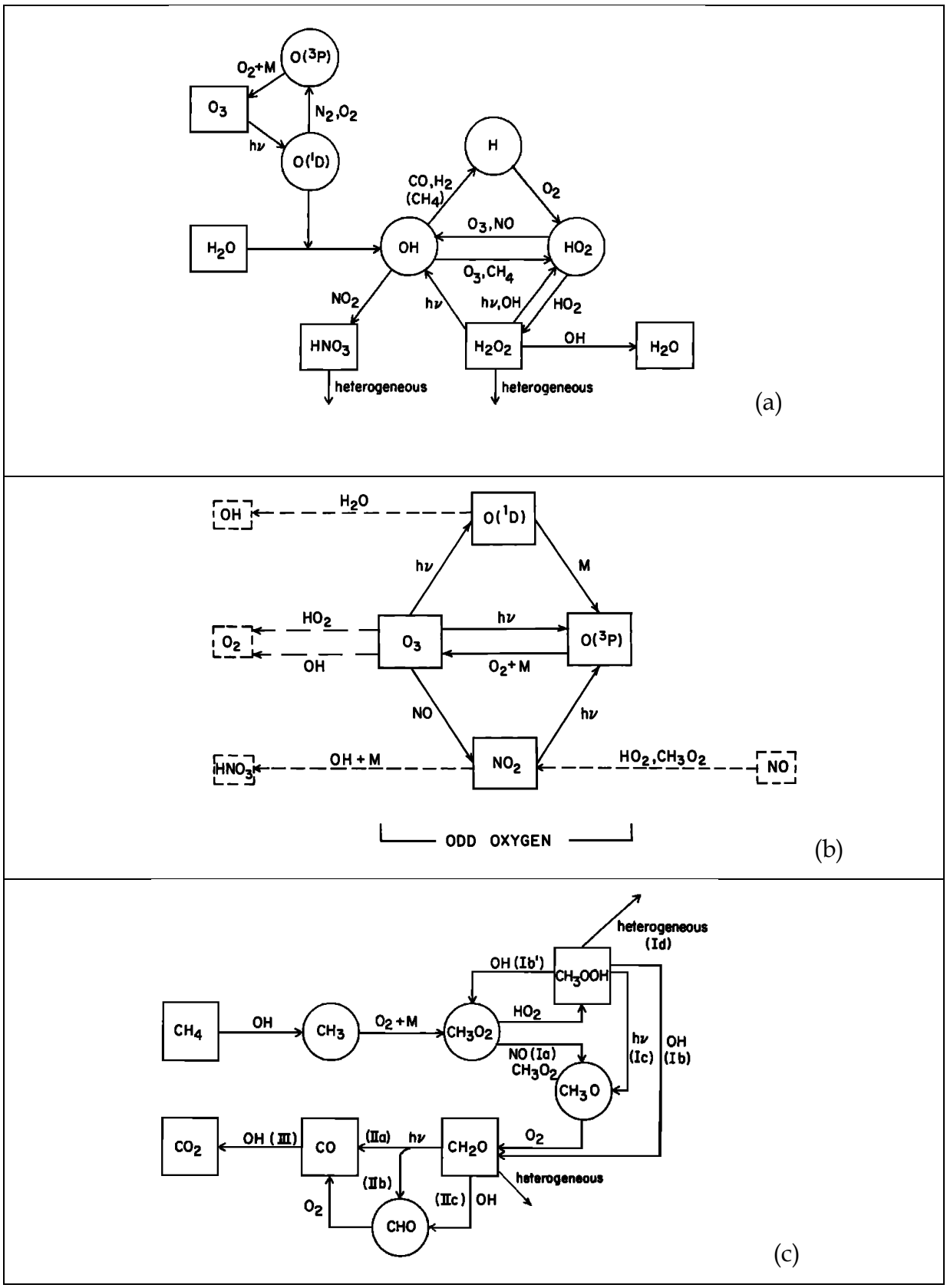


Figure 32 : Trois schèmes de réactions chimiques troposphériques aux implications globales [Logan *et al.*, 1981, pp. 7211, 7213 & 7216]

A la même période, à Jülich, en RFA, l'ancien chercheur de l''Atmospheric Quality and Modification Division' du NCAR, Dieter Ehhalt, réalise un travail théorique sur « le

couplage chimique des cycles du carbone, du soufre et de l'azote » dans la troposphère. Ces différents cycles "atmosphéro-océano-bio-…-sphériques" sont notamment couplés par le biais de réactions atmosphériques « entre molécules appartenant à ces différents cycles », écrit-il. La plupart de ces couplages – en particulier, de manière forte, le couplage entre cycles de l'azote et du carbone – « procèdent indirectement par leur dépendance commune au radical OH ». Ce composé radicalaire est nodal dans la chimie troposphérique. Il « initie en effet les plus efficaces élimination de la plupart des gaz » atmosphériques, écrit D. Ehhalt [Ehhalt, 1981 **in** *SCOPE*, 1981, p. 81]. En d'autres termes, le radical OH réagit avec la plupart des espèces oxydables émises (en particulier les composés organiques, le monoxyde de carbone et les NO_x)… si bien que les atmosphériciens l'ont surnommé "le détergent" de la troposphère. La figure 33 ci-dessous entend schématiser le cycle réactionnel des radicaux OH, qui relie les cycles du carbone, du soufre et de l'azote :

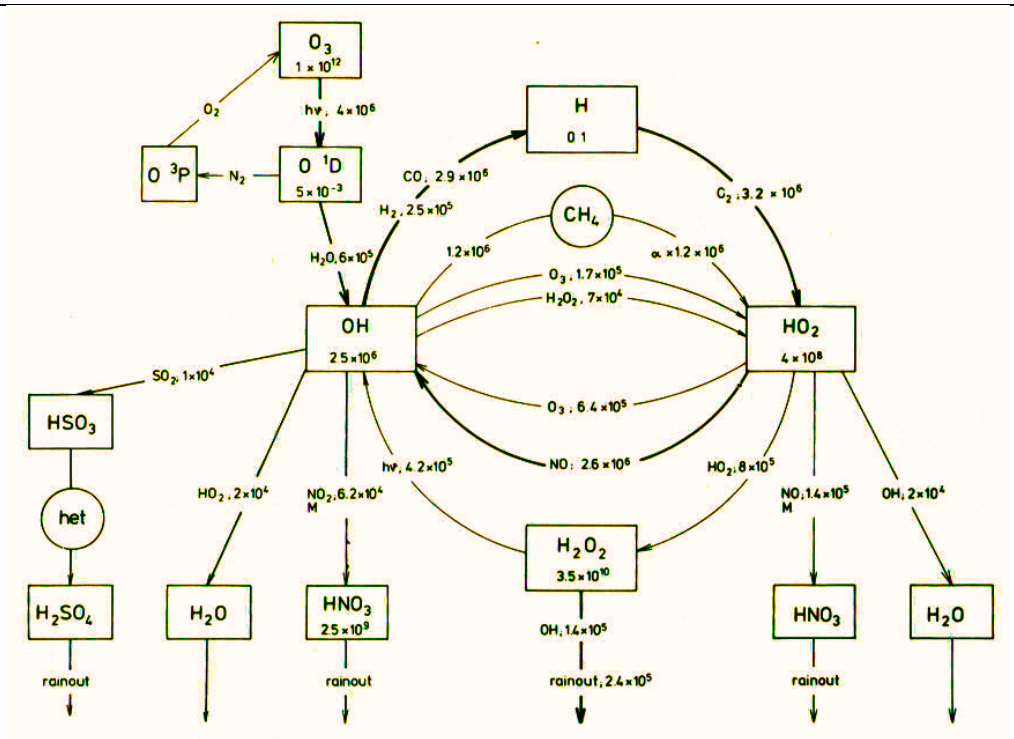


Figure 33 : Cycle réactionnel des radicaux OH (avec, dans les boîtes, les concentrations atmosphériques en cm^3, et, dans les flèches, les taux de conversion des radicaux en $cm^3.s^{-1}$) [Ehhalt, 1981 **in** *SCOPE*, 1981, p. 85]

Si la dynamique de travail sur la chimie troposphérique à grande échelle est principalement états-unienne, la science européenne emboîte le pas. Parfois, par le biais de chercheurs dont la maturation s'est faite aux Etats-Unis mais qui sont depuis revenus en Europe ; ainsi, D. Ehhalt et P. Crutzen. Parfois, dans des nations dynamiques dans la science des pollutions troposphériques, soit le Royaume-Uni, affecté par les smogs soufrées à Londres, soit dans les

pays scandinaves, menacés par les pollutions transfrontières acidifiantes, déjà fortement imprégnés de la culture de la protection de l'environnement local, comme global, et de surcroît l'un des berceaux de la météorologie théorique. En 1978, Hov Öystein, Eigil Hesstvest et Ivar Isaksen, de l'Institut de géophysique de l'Université d'Oslo, publient ainsi deux articles sur la formation et le transport régional (~1000 km) de l'ozone troposphérique ("Long-range transport of tropospheric ozone", *Nature* ; "Quasi-steady-state approximations in air pollution modeling: comparison of two numerical schemes for oxidant prediction", *International Journal of Chemical Kinetics*). L'expertise d'Ivar Isaksen sur l'ozone troposphérique le conduira à collaborer, aussi bien aux rapports de l'OMM sur l'ozone (Ex : Isaksen *et al.*, 1992, "Tropospheric processes: Observations and interpretation") qu'aux rapports du GIEC (voir Chapitre 8). Isaksen occupera en outre la présidence de l'IO3C entre 2004 et 2008.

Au niveau de la coopération internationale, enfin, l'OMM et l'ICSU promeuvent bien sûr cette montée en échelle de la chimie atmosphérique à des fins non-belligérantes (même s'il faut surtout comprendre ici « chimie atmosphérique » comme « composition de l'atmosphère » – l'OMM, en particulier, est un organisme de production de données avant toute chose). L'OMM crée un 'Working Group on Atmospheric Pollution and Atmospheric Chemistry'. En outre, l'une des commissions de l'IAMAS (International Association of Meteorology and Atmospheric Sciences ; qui est l'une des associations de l'IUGG (International Union of Geodesy and Geophysics, appartenant à l'ICSU), qui avait été fondée en 1957 sous le nom de Commission sur la chimie atmosphérique et la radioactivité, devient, en 1971, la Commission sur la chimie atmosphérique et la pollution globale (iCACGP, Commision on Atmospheric Chemistry and Global Pollution) (voir Chapitre 3). Le glissement sémantique est révélateur : les dangers liés à la radioactivité sont relégués au second plan, alors que l'iCACGP intègrera peu à peu des problématiques de ressources en eau, de production alimentaire globale et des santé de l'homme et des écosystèmes. Le premier président de la commission sera C.E. Junge (1971-75) [*iCACGP website*, 2014, http://www.icacgp.or, 14/06/2014].

Les cycles biogéochimiques

Le travail de Dieter Ehhalt que nous venons de citer constitue, en vérité, un chapitre du dix-septième rapport du comité SCOPE ('Scientific Committee on Problems of the Environment' ; ICSU ; SCOPE a été créé en 1969, et son premier rapport a été publié en 1972). Dans la « Partie II – Interactions entre les principaux cycles biogéochimiques » de ce rapport intitulé *Some Perspectives of the Major Biogeochemical Cycles*, le chapitre d'Ehhalt sur « le couplage chimique des cycles du carbone, du soufre et de l'azote dans l'atmosphère » côtoie

un chapitre sur « les interactions entre les principaux cycles biogéochimiques dans les écosystèmes terrestres » (de F.H. Bormann, N.M. Johnson, et G.E. Likens, l'écologue et biogéochimiste que nous avons rencontré dans les études états-uniennes sur les pluies acides, quelques années plus tôt), un chapitre sur « les interrelations entre cycles d'éléments dans les écosystèmes d'eau douce » (signé D.W. Schindler), et un autre sur « les interactions entre les principaux cycles biogéochimiques dans les écosystèmes marins » (de R. Wollast).

Les rapports SCOPE constituent jusqu'à nos jours l'une des principales références de la science des cycles biogéochimiques globaux, qui prend place au cœur de ce que les scientifiques désignent depuis les années 1990 sous le nom de Science(s) du Système Terre (voir nos Chapitres 8 et 9). L'interdisciplinarité des rapports SCOPE s'étend au-delà du royaume des sciences de la nature, comme en témoigne la « Partie III – Impacts socio-économiques sur les cycles biogéochimiques » de ce même Rapport n° 17, partie qui se décline en une étude des « impacts socio-économiques des effets de l'homme sur les cycles biogéochimiques : le soufre » de Göran Persson, du Comité de Protection de l'Environnement de Suède, et en une réflexion sur les « impacts socio-économiques des changements climatiques induits par le dioxyde de carbone, et les chances relatives des réponses politiques – prévention, compensation and adaptation » de la part de Klaus Michael Meyer-Abich, un Allemand, physicien de formation, qui a endossé des fonctions d'homme politique et d'expert public sur les politiques de l'environnement à partir de la fin des années 1970. [*SCOPE*, 1981]

Au tournant des années 1980, la NASA cherche à s'insérer dans la partie *scientifique* du programme sur les cycles biogéochimiques globaux. Elle le fait notamment par le biais de son programme sur la chimie *troposphérique*. Ce programme, McNeal souhaite avant tout qu'il soit un programme instrumental, puisque, selon lui, la chimie atmosphérique est un champ surtout limité par un déficit de mesures. Plus généralement, la NASA peut valoriser son potentiel de déploiement d'instruments de mesures – et ses capacités de logistique afférentes – pour un programme sur la chimie de *l'environnement* global "*vue à travers le prisme de l'atmosphère*". Ce programme intrinsèquement interdisciplinaire, principalement focalisé sur les cycles biogéochimiques globaux, intéresse les scientifiques des atmosphères planétaires de la NASA. C'est même l'un de ses anciens protagonistes, James Lovelock qui, après son passage à la NASA dans les années 1960, avait contribué à le stimuler, en proposant l'hypothèse Gaïa. Dès son premier ouvrage sur Gaïa publié en 1979 (*Gaia, A new look at life on earth*), le chimiste anglais n'y exposait-il pas une vision cybernétique de l'environnement global, avec au cœur de son épistémologie, la chimie, et en particulier la chimie du vivant, qui expliquait selon lui en grande partie le caractère chimiquement

complexe de notre troposphère, le fait que les couches atmosphériques proches de la surface terrestre soient « un curieux mélange de gaz réactifs pour toujours en mouvement et dans un désordre chimique, mais ne perdant jamais son équilibre ('balance') » (à l'inverse, les atmosphères des planètes voisines sont chimiquement simples – et donc, d'après Lovelock, abiotiques) ? [Conway, 2008, p. 157 ; Lovelock, 1987 (1979), p. 65]

Toutefois, comme nous avons commencé de le dire dans le Chapitre 5, l'apport principal de Lovelock ne sera pas sa contribution à la chimie troposphérique, mais une *vision holiste et interdisciplinaire* de la Terre – dont il exposera, avec Gaia, une version parmi d'autres, faisant la part belle au vivant. L'interdisciplinarité, ou plutôt la *transdisciplinarité* de Lovelock, se retrouve dans son emploi du terme « homéostasie », qu'il emprunte au « physiologiste américain distingué Walter B. Cannon » pour expliquer comment Gaïa utilise ses différents "membres" pour s'auto-réguler (et, en particulier, dans cette citation de 1979, pour « réguler la température planétaire »). Elle se trouve ensuite et surtout dans les emprunts sémantiques que Lovelock fait à la biologie, et en particulier à la science des écosystèmes. Les scientifiques des écosystèmes partagent en outre leur "logiciel" avec la théorie Gaïa : la cybernétique. Lovelock écrit :

> « Que nous considérions un simple four électrique, une chaîne de magasins de commerce contrôlée par un ordinateur, un chat endormi, un écosystème, ou Gaïa elle-même ('Gaia herself'), dès lors que nous considérons quelque chose qui soit adaptatif, capable de collecter de l'information, et d'emmagasiner de l'expérience et du savoir, alors son étude est une question de cybernétique, et ce qu'elle étudie peut être nommé « système ». » [Lovelock, 1988 (1979), pp. 61-62]

Lovelock déplore le manque d'attention portée par les atmosphériciens au processus de captations / libérations chimiques opérées par le vivant. Dans sa préface à *the Ages of Gaia* (1988), il pourfend en outre l'excès de spécialisation des sciences biologiques. Lynn Margulis, n'y a heureusement jamais succombé. Lovelock lui rend hommage : la « rare largesse de vue » de la biologiste, l'une des principales collaboratrices de Lovelock à l'hypothèse Gaia dans les années 1970, avait pu ainsi donner à Gaia « son contexte biologique », écrit le géochimiste anglais [Lovelock, 1988 (1979), pp. 56 & 61-62 ; Lovelock, 1990 (1988), p. xvi].[405]

[405] « Homéostasie » est un concept emprunté aux biologistes. Dans les années 1970, Lovelock se focalise plutôt sur une homéostasie particulière, pour expliquer les mécanismes de régulation et d'optimisation de la Terre globale : son hypothèse Gaïa est avant toute chose une forme d'homéostasie *atmosphérique* à l'échelle de la Terre globale, *par* et *pour* la *biosphère* (*cf.* le titre de l'article Lovelock & Margulis, 1973, « homéostasie atmosphérique par et pour la biosphère » est le titre).

Les « hypothèses » et « théories » Gaia cherchent à expliquer, à la fois des mécanismes de régulation et de changements rapides globaux (taux d'oxygène dans la l'atmosphère, salinité des océans, température de la surface de la Terre, *etc.*). Pour une histoire de l'évolution de l'hypothèse Gaia de Lovelock et pour un panorama des différentes « Gaia » (c'est-à-dire de schèmes explicatifs d'auto-régulation et/ou d'optimisation du système physico-bio-chimique de la Terre par et pour les organismes vivants dans leur ensemble, dans leurs interactions entre eux et avec les composantes inorganiques), proposées par une myriade de scientifiques, nous renvoyons par exemple à l'ouvrage du

Pour Lovelock, Gaia est un ensemble, un système cybernétique, dans lesquels les flux chimiques entre "sphères" jouent un rôle régulateur propice à la vie. La Figure 34 ci-dessous, datée de 1979, donne une version simple de ce système, représentant uniquement les échanges globaux d'oxygène et de carbone.

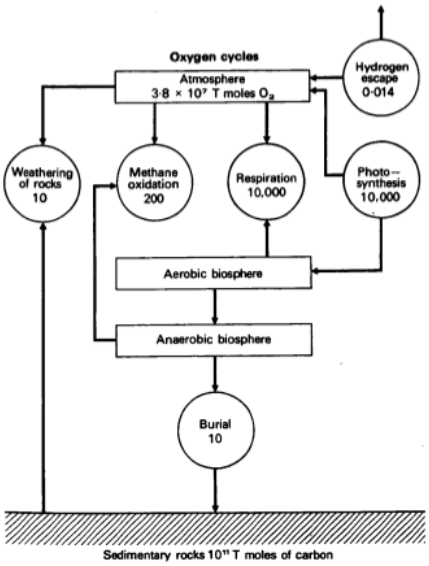


Figure 34 : Représentation schématique des flux d'oxygène et de carbone entre les principaux réservoirs de l'atmosphère, de la surface et des océans de la Terre, d'après J. Lovelock (quantités globales, en terramoles, pour des cycles annuels)
[Lovelock, 1988 (1979), « Figure 6 », p. 70]

En juin 1982, la NASA organise un grand 'Workshop' international à Woods Hole (Massachussetts), sous la direction de Richard Goody. Le rapport qu'il engendre s'intitule "Global Change: Impacts on Habitability. A Scientific Basis for Assessment". Son but est de valoriser le rôle que peuvent jouer les technologies et la logistique de la NASA dans l'étude du climat et dans l'étude des cycles biogéochimiques globaux. Les cycles globaux du carbone, de l'azote, du soufre et du phosphore, en effet, participent aux « changements globaux » et/ou sont affectés par eux, rappelle le rapport ; or, « l'intégrité ('the integrity') de ces cycles chimiques globaux est essentielle à la vie ».[406] Hélas, déplorent par ailleurs les auteurs du rapport, le programme de chimie troposphérique de la NASA est peu financé.

philosophe Michael Ruse (Ruse, 2013), ou à l'ouvrage collectif Schneider *et al.* (Eds.), 2008 (2004), dans lequel des scientifiques débattent au sujet de la théorie Gaia. Depuis 1985, se sont tenues quatre grandes Conférences internationales sur Gaia (1985, 1988, 2000, 2006).

[406] Nous l'aurons compris, le concept d'Habitabilité de la NASA s'inscrit dans la lignée des grands récits des sciences des origines et de la durabilité de la vie sur les planètes. Quelles conditions physiques, chimiques et biologiques permettent l'apparition et le maintien du vivant à l'échelle de la planète ?, questionnent les sciences des origines de la vie et l'exobiologie depuis le début du XX^{ème} siècle, dans la lignée des travaux d'Opalin et d'Holdane.

En outre, nous faisons remarquer que cette manière de parler "d'habiter" un espace contraste fortement avec celle des sciences humaines, qui questionnent le mode "d'habiter" de manière tout à fait différente et multiple – *cf.* les versions philosophiques (de Heidegger à Ricoeur), d'écologie politique (William Cronon, Jennifer Wolch, Mike Davis), *etc.*

Une meilleure compréhension de celle-ci et des impacts des changements globaux passe par une meilleure connaissance de diverses données globales et de nouvelles paramétrisations de processus physiques à incorporer dans les modèles numériques de cycles hydrologiques et biogéochimiques. [*NASA*, 1982, pp. 9 & iii]

Ce programme n'a rien de surprenant si l'on s'attarde sur la personnalité des auteurs du rapport. Parmi la cinquantaine de participants au 'Workshop' de 1982, on retrouve en effet, pour commencer, Lynn Margulis et Robert McNeal.[407] On y rencontre en outre des *océanographes* (John Steele, de la 'Woods Hole Oceanographic Institution', James Baker), des théoriciens de la chimie stratosphérique et de la chimie troposphérique globale (M. McElroy, P. Crutzen, R. Watson), des théoriciens du changement climatique (Ichtiaque Rasool, James Hansen, John Houghton, Veerabhadran Ramanathan). Wallace S. Broecker (1931-…), de l'Université de Columbia, participe également aux débats. Ses études sur le radiocarbone et la datation isotopique lui ont permis d'esquisser des cartes du climat passé de la Terre depuis le Pléistocène (époque géologique débutant il y a 2,6 millions et s'achevant il y a 12 000 ans). Broecker est en outre reconnu pour avoir développé et popularisé l'existence d'une circulation thermohaline à la fin des années 1980. Ce résultat venait couronner des travaux sur la chimie océanique (les traceurs océaniques) et le cycle global du carbone entamés dès les années 1970. Travaux qui lui donnaient toute sa place parmi les concepteurs d'un programme sur l'Habitabilité pour la NASA. [*NASA*, 1982, pp. 13 & 15]

Dans les années 2000, aux côtés de Klaus Lackner et Robert Kunzig, W. Broecker tiendra le haut de l'affiche médiatique pour ses prises de position en faveur d'une technique de géoingénierie pour contrebalancer le changement climatique : la séquestration à grande échelle du carbone atmosphérique dans les couches géologiques.[408] Nulle trace, en revanche,

---

[407] Il nous semble que la présence de L. Margulis "explique" ce choix du concept d'Habitabilité. Un choix à première vue étrange, à la lecture du rapport, qui est focalisé sur les risques que l'homme fait peser sur des équilibres à moyen terme qui sont favorables à sa prospérité (sens donné par les scientifiques de la Science du Système Terre), et non sur l'habitabilité de la Terre dans le sens habituel donné dans le champ scientifique, *i.e.* appliqué à l'ensemble du vivant à long terme, sens que lui donnent les scientifiques des origines de la vie (*cf.* la note de bas de page précédente) ou Lovelock. Le terme d'habitabilité disparaîtra d'ailleurs rapidement des appels d'offres de la NASA relatives au travail sur le système Terre (… mais reste, bien sûr, utilisée dans d'autres traditions chères à la NASA. L'Habitabilité est une notion qui traverse toute la tradition des sciences des origines de la vie. Elle signifie alors, soit « conditions physico-chimiques » de vie sur une planète, soit conditions de vie possibles des astronomes, ou plus généralement d'hommes, dans un milieu confiné, comme on le fait dans la science des 'Closed Loop Ecological System', de type 'Biosphere 2'. La NASA développe elle-même les 'Closed Loop Ecological System' intégrant des hommes depuis 1970. Il existe par ailleurs aujourd'hui à la NASA un 'Habitability Design Center' (HDC), au sein duquel sont développées des combinaisons et des infrastructures destinées à isoler l'homme de divers types d'environnements extrêmes.

[408] En 2008, Broecker a ainsi publié un *Fixing Climate. What Past Climate Changes Reveal About the Current Threat – and How to Counter It* (avec Robert Kunzig). Les motivations de Broecker sont exposées sur le site de son Université de Columbia (http://www.earth.columbia.edu/articles/view/2246 (10/10/2013)).

Dans le grand récit que construit Broecker, construire une planète habitable serait aujourd'hui devenu une affaire délibérément humaine : l'homme affecte les cycles du carbone et le climat, il doit en retour les contrôler au plus vite, de quelque manière que ce soit (y compris, à l'aide de la géoingénierie). En 1988, Broecker avait publié un *How to Build a Habitable Planet*. Vingt-quatre ans plus tard, « Wally Broecker » récidivait dans une version révisée et étendue intitulée *How to Build a Habitable Planet. The Story of Earth from the Big Bang to Humankind*, cosignée par le géochimiste

de propositions d'ingénierie des cycles biogéochimiques ou du climat dans le rapport de la NASA. Le contexte n'y était pas favorable ; en effet, le reflux de la modification intentionnelle de la météorologie et du climat dans la littérature scientifique avait été massif au cours de la décennie 1970, notamment à cause de l'abandon presque complet des travaux dans la recherche publique (civile ou militaire) [Fleming, 2006 ; Kwa, 2001 ; Briday, 2014]. S'inscrivant dans la logique du "tournant environnemental" de la NASA "pour" l'ozone et "contre" le changement climatique, les auteurs du rapport sur l'Habitabilité proposent un programme qui marie : d'une part, une *science "fondamentale"* et inédite du fait de sa composante satellitaire, *i.e.* une science très attractive pour les chercheurs ; *et*, d'autre part, une *science plus immédiatement "utile"*, dans une perspective particulière d'estimation d'éventuels risques environnementaux globaux liés aux activités humaines – et non, dans une perspective de maîtrise conquérante de la nature (la NASA serait pourtant toute désignée pour réfléchir à l'envoi de miroirs géants dans l'espace afin de "réparer" ou d'améliorer le climat, proposition plusieurs fois réitérée par des scientifiques au cours des décennies précédentes [Fleming, 2010, pp. 207-208]).

Dans le rapport de 1982, la NASA explique qu'elle s'est déjà positionnée dans un large programme OMM/ICSU, l''International Satellite Cloud Climatology Project (ISCCP)', devant se dérouler entre 1983 et 1988 sous les auspices du 'World Climate Research Program'. Et qu'elle s'inscrit, plus généralement, dans un cadre international – « nulle nation ne saurait mener seule » un programme sur l'habitabilité globale, déclament les rédacteurs du rapport. Néanmoins, les financements se jouent sur la scène nationale. Aussi, le rapport argue-t-il qu'aucun programme de recherche national, pas même le 'National Climate Program' lancé en 1978, ne possède une envergure scientifique aussi large que le programme sur l'Habitabilité proposé par la NASA. [*NASA*, 1982, pp. 9 & 13]

Mais, la science des cycles biogéochimiques demeure une science "d'avant-garde" au début des années 1980. Les débuts du programme de la NASA sur les cycles biogéochimiques « vitaux » seront ajournés à de nombreuses reprises. Il faudra attendre 1990 pour qu'un programme inspiré du rapport de 1982 (et de ses successeurs) voie enfin le jour.[409] 'Mission to Planet Earth' sera lancée en 1990. Elle s'articulera autour de quatre thèmes principaux : la détermination de la structure et de la dynamique de l'intérieur et de la croûte de la Terre ; la compréhension de la structure, de la dynamique et de la composition

Charles H. Langmuir (un homonyme d'Irving Langmuir – s'agit-il d'un membre de sa famille ? –, le Prix Nobel de Chimie 1932 et principale figure du champ d'études théoriques et pratiques sur la modification intentionnelle du temps après-guerre). Le Chapitre 20 de l'ouvrage a pour titre "Mankind at the Helm : Human Civilization in a Planetary Context" ; soit, littéralement « L'Humanité à la barre (du navire) : la Civilisation Humaine dans un Contexte Planétaire » [Langmuir & Broecker, 2012, p. 597].

[409] Sur les facteurs qui freinèrent puis permirent sa mise en place, voir Conway, 2008, pp. 213-241.

chimique de l'atmosphère, des océans et de la cryosphère, ainsi que leurs interactions ; la caractérisation des interactions entre organismes vivants et leur environnement ; et, la compréhension des interactions entre l'homme et son environnement naturel. Initialement, le noyau dur de la mission, l''Earth Observing System' (EOS), devait résulter du lancement de deux gros satellites, mais comptera finalement sur une myriades de petits satellites. Ses prérogatives dépasseront les requêtes du « panel Goody » de 1982. Alors que R. Goody et ses collègues avaient mis en avant les processus qui se produisaient sur des échelles de temps pluri-décennales et pluri-centennales, qui intéressaient les décisionnaires politiques, la mission EOS se donnera finalement des objectifs plus vastes, pour travailler sur des échelles de temps plus longues. Ceci induirait des rallonges budgétaires. Alors que la NASA venait d'achever les préparatifs de l'EOS, en 1989, l'agence projetait un coût de 17 milliards de dollars jusqu'à l'an 2000. Il faudra attente 1997 pour qu'un premier satellite soit mis en orbite dans le cadre de l'OES. [*NASA*, 1982 ; Conway, 2008, pp. 229-232][410]

Pour conclure, après avoir été, jusqu'alors, étudiés principalement par des "écosystémiciens" (Vernadski, les frères Odum, *etc.*) qui ne plaçaient pas les caractéristiques atmosphériques globales (température moyenne de l'atmosphère, circulation générale, composition chimique) au cœur de leurs préoccupations, à partir des années 1950, les cycles biogéochimiques globaux ont été formalisés beaucoup plus systématiquement "à travers le prisme de l'atmosphère", à la faveur de l'extension du réseau de mesures atmosphériques et de la conquête technologique de l'atmosphère engagée par les sciences de la Guerre froide. Des quantifications des gaz traces étaient désormais rendues possibles en des lieux plus variés, et avec une fréquence plus importante. Or, pour en expliquer les concentrations, il fallait émettre des hypothèses sur leurs possibles sources et puits dans la biosphère, la

[410] Au cœur du programme inter-agence états-unien sur le climat lancé en 1978, naquit à la NASA l'idée de constituer l''Earth Observing System' (EOS), programme que l'agence spatiale promut et prépara dès les années 1980, comme le narre Erik Conway :

> "During the 1980s, NASA advocated for, and finally won approval of, an Earth Observing System (EOS) to study global change, defined very broadly. Among many other things, EOS was to examine land use change, ocean circulation and heat storage, atmospheric temperature, chemistry, circulation, and radiative properties. [EOS began to take shape in the early 1990.] At a projected $17 million cost in its first 10 years, it was to be the most expensive science program in American history, exceeding even the $11 billion Superconducting Super Collider: the biggest of big science. But [because of "seemingly unending reviews, redefinitions, rescopings, and rebaselinings consumed time, squandered project resources, and demoralized staff", and] as political opposition to climate science mounted in the 1990s, NASA's grand ambitions were cut severely, reducing EOS to a "mere" $7 billion. By 2004, EOS had become an orphan, with NASA's own leaders no longer supporting its continuation. Instead, they sought to transfer the politically contentious system, and its scientific responsibilities, to some other agency."

Dans les années 2000, l'EOS regroupera finalement un ensemble de satellites de télédétection chargés de collecter des données sur de longues périodes, sur la biosphère, l'atmosphère et les océans terrestres. Le premier satellite de ce programme, dont les objectifs dépassaient donc le cadre de la science du climat global, avait été lancé en 1997. Ce programme, prévu initialement pour être le projet le plus coûteux de l'histoire de la 'Big Science' de l'espace (17 milliards de $), rencontra de nombreuses oppositions, y compris au sein des élites de la NASA. [Conway, 2008, pp. 2 & 243]

lithosphère, les océans et, enfin, dans l'atmosphère (à l'aide d'une théorie chimique de l'atmosphère). L'auteur de l'hypothèse Gaïa, James Lovelock, offre un exemple d'incursion des atmosphériciens dans l'étude des cycles biogéochimiques globaux. Aux yeux de certains scientifiques, il est même patent que les études sur l'atmosphère sont devenues hégémoniques dans l'étude des cycles biogéochimiques, aux dépens des travaux sur les sols et l'hydrosphère (dont les caractéristiques chimiques, complexes, sont intimement liées à l'activité d'organismes vivants). Cette situation expliquerait en partie la mauvaise formalisation des cycles [Ivanov, 1983][411].

La théorie Gaïa prend place dans un champ particulier d'élaboration de cycles biogéochimiques. Elle prolonge une vieille sous-discipline de la biogéochimie, les sciences des origines de la vie (initiées dans les années 1920 par Oparin et Haldane), pour formaliser *la co-évolution de la vie et des cycles biogéochimiques à l'échelle géologique*. Mais, l'approche de J. Lovelock est singulière, du fait de l'immense importance qu'il donne au vivant dans la genèse de sa propre prospérité sur Terre. Par ailleurs, le chimiste anglais s'inscrit dans la dynamique de son époque, en mettant l'accent sur les *impacts récents de l'homme* sur les cycles biogéochimiques. Dans un rapport SCOPE daté de 1983, le biochimiste russe M.V. Ivanov insiste sur le fait que l'intérêt croissant porté aux cycles biogéochimiques globaux n'est pas seulement le fruit d'une augmentation importante de mesures quantitatives pertinentes pour ce champ, mais également de craintes environnementales (rejets industriels, nouvelles activités agricoles, occupation des sols).

Toutefois, déplore M.V. Ivanov, ces sciences du Système Terre primitives échouent encore souvent à estimer quantitativement les flux de composés chimiques entre "sphères" (atmosphère, hydrosphère, lithosphère), et se présentent principalement comme des inventaires des quantités de composés chimiques présents au sein de ces différents grands ensembles [Ivanov, 1983, pp. 449-450]. Leurs protagonistes admettent en outre encore souvent se trouver dans l'incapacité de conseiller le politique. Les rapports SCOPE des années 1970 et du début des années 1980, qui constituent l'une des principales références de la biogéochimie sur le plan international, et qui réunissent une large palette disciplinaire de

[411] Dans le rapport SCOPE de 1983, le biochimiste M.V. Ivanov (*Institute of Biochemistry and Physiology of Microorganisms, USSR Academy of Science*) fait état de la place hégémonique prise par les données atmosphériques dans l'étude des cycles biogéochimiques globaux du soufre, et des limites d'une telle approche "par l'atmosphère" :

> "Most of the discussion in [the published reviews on the global biogeochemical sulphur cycle] was devoted to sulphur turnover in the atmosphere and some fluxes were only considered to balance the atmospheric cycle. Consequently, many fluxes were estimated from an analysis of the processes occurring in the atmosphere. Because the lithosphere and hydrosphere were not as well studied as the atmosphere, such an approach was justified. However, this led to significant differences in estimates of some biogeochemical processes. […] In the assessment of the atmospheric cycle of sulphur, some fluxes were estimated from limited factual material using a number of *a priori* assumptions, and thus there is an obvious need for independent estimates of the individual fluxes within the global biogeochemical cycle of sulphur." [Ivanov, 1983, p. 449]

chercheurs, témoignent de la circonspection des protagonistes de ce jeune champ. [*Cf.* rapports SCOPE, 1972-1984 ; Dobben & Lowe-McConnell (Ed.), 1975 ; *NASA*, 1982].

La montée de la thématique du changement climatique à la NASA

La science des cycles biogéochimiques globaux demeure une science "d'avant-garde" au début des années 1980. Et, elle n'ouvre vers aucune perspective de gouvernance particulière de l'environnement. Dans un tel contexte, difficile d'obtenir des financements. Ses promoteurs y parviendront, mais il faudra attendre pour cela les années 1990 (avec l'EOS, l'IGBP, *etc.*), au cours desquelles on parlera désormais de science du système Terre (voir Chapitres 8 et 9). Quel sera l'argument massue invoqué ? Son utilité dans la science du changement climatique. Déjà, dans le rapport sur l'Habitabilité, les premiers zélateurs d'une science du système Terre martelaient l'intérêt des cycles biogéochimiques globaux, et en particulier du cycle global du carbone, dans la compréhension du changement climatique. Et, en retour, le fait que « les questions d'habitabilité soient particulièrement sensibles aux variations du climat global » [*NASA*, 1982, p. 5].

La littérature sur la construction de l'urgence climatique est pléthorique, y compris parmi les historiens des sciences et dans le champ STS.[412] Nous nous proposons ici seulement de donner les grandes étapes de l'intégration de la NASA au sein de ce programme.

Créée au milieu de l'année 1958, la NASA devait relever le défit de la conquête spatiale lancé par les Soviétiques avec la mise sur orbite du premier satellite artificiel Spoutnik un an auparavant. La modélisation de la dynamique de la haute atmosphère était un préalable à la mise en place des satellites, si bien que la NASA décida rapidement, non seulement d'utiliser les savoirs météorologiques dans la préparation de ses vols, mais également, en retour, de participer à l'élaboration de ces savoirs. La présence de ses engins dans l'espace offrait de fait à la NASA une perspective inédite d'observation de l'atmosphère. Dès les débuts de l'agence, des météorologistes et géologues exogènes à la NASA cherchent à promouvoir l'utilisation météorologique des satellites. [Tatarewicz, 1990, pp. 7-12]

Lancé le 1er avril 1960, le satellite TIROS-1 devient le premier satellite météorologique opérationnel (pendant 78 jours) en orbite. Bien que TIROS soit le fruit d'un transfert du projet JANUS de l'armée états-unienne (William Kellogg de la RAND était le directeur de son panel scientifique) à la nouvelle agence NASA, la postérité du programme n'est pas exclusivement météorologique, ni belligérante. Au sein du 'Weather Bureau', Harry Wexler a mis en place en 1958 une section nommée 'Meteorological Satellite Division', devant

[412] Nous renvoyons par exemple aux travaux de Paul Edwards, Clark Miller, Joshua Howe, Matthias Dörries, Amy Dahan, Stefan Aykut, Mike Hulme.

comparer les photographies de la couverture nuageuse à des cartes météorologiques standard. TIROS-1 offre de telles "photographies" de la couverture nuageuse (il s'agit en fait « d'images télévisées » – d'où les lignes horizontales visibles sur les images de TIROS), que Wexler étudie en détail. Il y décèle des traces de « glace de mer » dans le Golfe du Saint-Laurent. Par voie de conséquence, poursuit l'historien Sebastian Grevsmühl, « le 8 février 1962, la 'Navy' américaine, en collaboration avec le 'Weather Bureau' et le gouvernement canadien, lancent un projet majeur de reconnaissance de la glace dans le Golfe du Saint-Laurent. Baptisé « TIREC » (TIROS ice reconnaissance), il a pour objectif « de développer des procédures et techniques afin d'interpréter des résultats satellitaires de la formation de la glace (*NASA*, 1963) ». TIROS-2, lancé le 23 novembre 1960 transporte à son bord un 'Medium Resolution Infrared Radiometer' (MRIR) ; il étend ainsi les compétences de TIROS par-delà la capture d'images, pour étudier les spectres dans l'infrarouge.

TIREC, souligne S. Grevsmühl, fait partie de ces cas typiques de la Guerre froide où l'observation "environnementale" est sous « patronage militaire ». Elle est mise en place non seulement pour son intérêt scientifique, mais aussi pour des intérêts économiques (par exemple, la détection de "ressources naturelles"), logistiques et stratégiques (*i.e.* militaires), ainsi que des visées géopolitiques. « Du point de vue scientifique », ajoute l'historien, l'observation de la glace de mer devient indispensable pendant les années 1960 en tant qu'indicateur du réchauffement local, mais aussi pour des mesures de l'albédo de la Terre et de la température et de la circulation de l'eau. Autant de facteurs devenus par la suite très importants dans le cadre de la construction de la problématique du changement climatique.[413] Il s'agit, en particulier, d'autant de facteurs importants pour les chercheurs qui

[413] A partir des années 1960, les satellites participent à la construction de la problématique du changement climatique global, de ses "causes" (hausse des concentrations en GES, déforestation, *etc.*) et de ses "impacts". Il faut souligner la rapide généralisation des satellites dans les pratiques de recherche sur l'atmosphère, la biosphère, l'hydrosphère, la cryosphère, *etc.*, dans l'élaboration de cycles (du carbone, de l'eau, de l'énergie, *etc.*). Il ne faut toutefois pas exagérer leur rôle. Certes, monter à bord des satellites des appareils aptes à capturer des images ou à effectuer toutes sortes de mesures physico-chimiques depuis le ciel change radicalement la vision symbolique et la mise en nombres de la Terre. Mais, ceci ne signifie pas que les mesures satellites soient privilégiées par rapport aux mesures au sol, à partir des années 1960. La plupart des études sur l'environnement global combinent les deux. Et même, les données satellites sont régulièrement inaptes à répondre aux questions posées, du fait de leur position dans l'espace et de la couverture nuageuse, parfois, mais également du fait de leur caractère peu modulable. Parmi les acteurs que nous avons rencontrés, Richard Goody a publié à plusieurs reprises des réflexions sur la nature du programme satellitaire à mener pour améliorer la science du changement climatique. Lire par exemple Goody Richard, 1999 (1996), "Observing the Earth: A Frankenstein Dilemna" et Goody Richard, 2002, "Observing and thinking about the atmosphere".

Il existe une littérature scientifique pléthorique sur l'utilisation des satellites dans la construction disciplinaire des "environnements globaux". La littérature d'histoire des sciences n'est pas en reste. Sur le rôle des satellites dans la construction du changement climatique et de la « machine Terre », nous renvoyons par exemple au travail de Paul Edwards, notamment aux Chapitres 8 à 11 d'Edwards, 2010. On constatera que les satellites ne sont que des instruments parmi d'autres dans la construction du problème climatique. Dans les années 1960-70, la météorologie – et non le climat global – constitue la raison principale de l'envoi de satellites (en ce qui concerne l'aspect atmosphère). Par la suite, les satellites ont en fait toujours peiné à s'imposer comme des instruments centraux dans la construction climatique, en raison de leur coût, mais aussi bien sûr parce qu'ils furent lancés tardivement et ne peuvent donc guère participer à la construction de récits climatiques sur le long terme. Ils n'en demeurent pas moins

travaillent sur l'interface océan-atmosphère à grande échelle, dont beaucoup se réuniront à la NOAA à partir de 1970 (date de sa création). Le programme satellitaire Nimbus, initié dès 1959 mais aussi successeur de TIROS, sera dans un premier temps le fruit d'une coopération entre la NASA et l''Environmental Satellite Service Administration' (ESSA), l'une des institutions que phagocytera la NOAA. Nimbus-1, lancé le 28 août 1964, transportera notamment un nouveau radiomètre à infrarouges, le 'High Resolution Infrared Radiometer' (HRIR).[414] [Grevsmühl, 2012, pp. 301-314 ; Conway, 2008, pp. 30-31 ; *CES*, 2012]

Les satellites de la NASA sont donc loués par l'élite des météorologistes et géophysiciens dès les débuts de l'institution. La NASA rassemble par ailleurs de nombreux scientifiques des atmosphères planétaires, qui pour certains se sont invités au débat sur le rôle climatique du CO_2 dès l'immédiat après-guerre (voir Chapitre 2), avant de rejoindre l'agence. Le CO_2, reconnu comme la signature caractéristique de l'atmosphère de certaines planètes (sur Vénus et Mars, sa teneur moyenne est supérieure à 95%), est devenu un objet important d'étude de la planétologie comparée. Avec sa mise à l'agenda dans les années 1960-70, de nombreux scientifiques de la NASA font de la thématique du changement climatique d'origine anthropique une priorité. James Hansen en est l'exemple le plus connu. Au sein du 'Goddard Institute for Space Studies' (GISS), il commence ses études sur le CO_2 dans l'atmosphère vénusienne au début des années 1970 ("On the Interpretation of the "Inverse Phase Effect'" for CO_2 Equivalent Widths on Venus", 1973, *Icarus*), puis publie dès 1976 un article intitulé "Greenhouse effects due to man-made perturbation of trace gases" (Wang, W.-C., Y.L. Yung, A.A. Lacis, T. Mo & J.E. Hansen, 1976, *Science*, n° **194**, pp. 685-690), avant de devenir l'un des premiers lanceurs d'alerte et des spécialistes du changement climatique les plus en vue dans les années 1980. En 1990, il participera à la rédaction des Chapitres 6 et 8 du premier rapport du Groupe I (WG I ; 'Working Group I: Scientific Assessment of Climate Change') du GIEC). En 1981, il avait pris la tête du GISS, dont il avait fait le principal laboratoire d'étude sur le changement climatique à la NASA. Hansen poursuivra sa carrière au GISS jusqu'en 2013, lorsqu'il se retirera après quarante-six années passées au sein de l'Institut.

---

qu'ils constituent aujourd'hui des instruments de choix de la science climatique, d'autant plus que la gouvernance climatique se focalise de plus en plus sur les effets actuels et à court et moyen terme du changement climatique (depuis le milieu des années 2000, en particulier) – en vue notamment de travailler à l'"adaptation au changement climatique", à l'élaboration de propositions de technologies de géoingénierie, *etc.* (voir Chapitres 8 et 9). Pour une histoire "entre France (CNES) et Etats-Unis" de l'utilisation des satellites dans la science du changement climatique, nous renvoyons aux travaux de notre collègue du Centre A. Koyré, Gemma Cirac.

[414] C'est à bord de Nimbus-7, lancé le 24 octobre 1978, que se trouve le premier 'Total Ozone Mapping Spectrometer' (TOMS). Cet instrument jouera un rôle décisif dans l'élaboration de cartographies globales de l'ozone et dans la construction "d'images" (de modélisations numériques) du trou de la couche d'ozone… et sur un plan social, un rôle important dans l'hégémonie de la NASA et de la NOAA en matière d'ozone, au cours de la décisive décennie 1980. Voir notre Chapitre 7.

Cette thématique du changement climatique cadre particulièrement avec le "tournant environnemental" de la NASA des années 1970. Au cours de cette décennie, le changement climatique est toujours traité en parent pauvre de la recherche, malgré les résultats communiqués par C. Keeling dans les années 1960 sur l'augmentation des taux de CO_2 dans l'atmosphère. Toutefois, la situation de la recherche états-unienne sur le changement climatique évolue positivement en 1978, avec le vote du 'National Climate Program Act' par le Congrès. La coordination entre agences fédérales ne sera pas chose aisée.[415] Mais, le rôle de la NASA sera « relativement clair dès le début », affirme Erik Conway : « fournir des données globales, exactement comme cela avait été le cas avec le programme météorologique » stimulé par Wexler. Et, en fait, le système de satellites météorologiques formera la base du système d'observation climatique initial – qui évoluera vers l'OES. [Conway, 2008, p. 231]

Avec le programme sur le changement climatique, les chercheurs de l'agence fédérale cherchent, à la fois à étendre leur activité d'expertise pour le politique, de la météorologie et l'ozone au changement climatique, et à obtenir des fonds pour une recherche plus fondamentale, réclamée notamment par les scientifiques de la NASA, et qui promet de plus d'attirer de nouvelles pointures des sciences de l'atmosphère. Dans le programme inter-agence états-unien sur le changement climatique, la NASA va jouer un rôle important dès les années 1980 (qui sera beaucoup renforcé à partir de 1997, avec une vingtaine de satellites lancés en l'espace de vingt-cinq ans dans le cadre d'EOS). Dans le Premier rapport du WG I du GIEC, en 1990, la NASA était représentée par quinze contributeurs et relecteurs. C'est à peine moins que les deux institutions états-uniennes de référence sur le changement climatique (NOAA : 24 ; NCAR : 16)…[416] Institutions avec lesquelles, faut-il préciser, la NASA collabore de manière rapprochée dans le cadre de ses programmes sur l'atmosphère, y compris satellitaires (les lancements et maintenances de satellites d'observation environnementale états-uniens sont souvent confiés au couple NASA/NOAA). [*IPCC*, 1990, pp. 245-258]

---

[415] Erik Conway a souligné les difficultés, les lenteurs du programme climatique états-uniens, non seulement dans les années 1970, mais également après le vote du 'National Climate Act' :

> "After passage of the National Climate Program Act of 1978, officials from NASA, NOAA, and the other science agencies of the federal government had struggled for several years to formulate an interagency climate research program. Unlike the stratospheric ozone problem, climate research would involve virtually every Earth science discipline, and therefore the entire science establishment of the federal government. This made coordination very difficult." [Conway, 2008, p. 213]

Quant à la construction programmatique de l'"Earth Observing System' (EOS), elle est indissociable de ce programme inter-agences sur le climat. Nous renvoyons sur ces points à Conway, 2008, Chapters 7-9.

[416] Notons, en outre, une présence non négligeable des 'National Laboratories' (Lawrence Livermore National Laboratory ; Los Alamos National Laboratory ; Oak Ridge National Laboratory), laboratoires initialement militaires, puis passés sous financements du 'Department of Energy' en 1978, l'une des quatre institutions désignées responsables du Plan climat fédéral états-unien en 1978. [*IPCC*, 1990, pp. 245-258]

Conclusion de la Partie B

Dans cette Partie B, nous avons souhaité nous arrêter sur un moment particulier de l'histoire de la chimie atmosphérique globale, qui a été jusqu'à présent seulement "survolé" par les historiens. Nous avons montré que la controverse autour de la théorie chimique de la couche d'ozone aux Etats-Unis dans les années 1970 a été un moment décisif dans la genèse d'un champ d'étude sur la chimie atmosphérique globale, et même plus généralement sur la chimie atmosphérique, qui allait désormais se présenter comme une discipline scientifique à part entière (ou, tout le moins, comme une sous-discipline des sciences de l'atmosphère). Cette controverse a, dans le même temps, marqué l'entrée de l'aéronomie dans une ère "protectionniste (de l'environnement)". En outre, elle a reconfiguré le champ d'étude aéronomique, avec l'arrivée de chimistes de formation, et l'amplification de l'intérêt des scientifiques des atmosphères planétaires, des géochimistes et des météorologistes pour la stratosphère terrestre. Enfin, comme toute controverse, elle a généré des jeux de pouvoirs politiques nationaux et transnationaux. En même temps, elle a fait apparaître entre scientifiques des oppositions politiques ou disciplinaires enfouies, qui expliquent que certains aient eu foi dans les hypothèses de Johnston et de Molina-Rowland, et d'autres non.

Petites causes, grands effets : la transformation épistémologique opérée par les chimistes

La première conclusion est d'ordre épistémologique. En s'intéressant à la stratosphère, des chimistes de l'atmosphère et des chimistes de laboratoire (H. Johnston, M. Molina, S. Rowland) projettent sur la couche d'ozone leur conception d'une atmosphère fortement réactive chimiquement. D'après ces scientifiques, à l'image de ce que l'on observe dans le laboratoire ou dans l'atmosphère de la région de Los Angeles, de faibles concentrations de polluants peuvent générer des modifications importantes, à des échelles de temps relativement courtes (de l'ordre de quelques décennies, en ce qui concerne les actions des STS et CFC sur la couche d'ozone). Des composés azotés, bromés et chlorés,[417] se retrouvant dans des concentrations atmosphériques relatives de l'ordre de 10^{-9}, soit trois à quatre ordres de grandeur au-dessous des concentrations atmosphériques typiques des autres gaz traces (H_2O, CH_4) [Nicolet, 1978, p. 11] peuvent, en théorie, détruire quelques pourcent des trois ou

[417] L'action des émissions de méthane naturel voire anthropique sur les taux d'ozone a également été étudiée de manière systématique dès les années 1970. Nous n'avons pas évoqué ces travaux, beaucoup moins en vue que les travaux sur les NO_x, et surtout ceux sur les composés chlorés (CFC) et bromés ou iodés (halons) issus de l'industrie chimique. Précisons, par ailleurs, que les composés désignés sous le nom de « fluorochlorométhanes » ne sont autres que des chlorofluorocarbones (CFC). Ils contiennent du carbone, du chlore et du fluore, et sont produits comme dérivés volatiles du méthane et de l'éthane. Les produits réfrigérants domestiques ou contenus dans les unités de climatisation commercialisés sous le nom de « Fréon » sont des fluorochlorométhanes. Les fluorochlorométhanes (comme les autres CFC, et par ailleurs les halons) sont aujourd'hui réglementés par le Protocole de Montréal.

quatre molécules d'ozone sur un million de molécules stratosphériques… provoquant un afflux d'UV qui peut poser des problèmes de santé potentiellement très graves, et induire un réchauffement climatique global non négligeable. Deux notions scientifiques sont décisives : d'une part, les réactions chimiques formalisées sont *catalytiques* (c'est-à-dire qu'elles font intervenir des espèces chimiques, les catalyseurs, qui, par leur transformation, accélèrent la production ou la destruction de certains espèces, puis sont régénérés en fin de réaction) ; d'autre part, mise à part leur participation à la chimie de l'ozone stratosphérique, les polluants considérés sont très stables chimiquement, et peuvent donc potentiellement demeurer longtemps dans l'atmosphère, où ils s'accumulent.[418] La vitesse "catalysée" des réactions, et surtout le fait que les CFC s'accumulent dans la stratosphère, donnent une force particulière à l'argument de précaution, régulièrement brandi depuis les années 1970 afin de justifier des règlementations des CFC.

Autre point. A l'inverse des pluies acides et des smogs, dont on peut observer des manifestations sensibles – destruction des forêts, altération des bâtiments, gênes oculaires, difficultés à respirer –, la destruction d'ozone se présente comme une menace « invisible »… L'imaginaire collectif des années 1970 est marqué par ce « passage du visible à l'invisible » autant que par le passage du « local au global ». Ces tendances se radicaliseront dans les années 1980, avec la menace invisible du nuage de Tchernobyl, la montée en puissance médiatique du changement climatique… et, lorsque la destruction de la couche d'ozone sera précisément "rendue visible" par les scientifiques de la NASA à la fin des années 1980, quand leurs « magnifiques images multicolores représentant la réduction dramatique de la couche d'ozone au-dessus de l'Antarctique » (qui n'étaient autres que des « images de synthèse tirées d'un montage vidéo censé simuler le fonctionnement d'un modèle ») seront diffusées dans les journaux et sur les écrans de télévision du monde entier, se rappelleront Jacques Theys et Bernard Kalaora quelques années plus tard dans *La Terre outragée* [Theys & Kalaora, 1992, p. 19].

[418] Prenons l'exemple de la publication de M. Molina et S. Rowland, "Stratospheric sink for chlorofluoromethanes: chlorine atom-catalyzed destruction of ozone" (1974). Les halocarbones dits « chlorofluorométhanes » que décrivent Molina et Rowland sont, dans un premier temps, photodissociés : les halogènes se séparent de leurs hydrocarbones. Dans un deuxième temps, les molécules halogénées libérées, en particulier les chlores, s'emparent du troisième atome d'oxygène de l'ozone. Enfin, dans un troisième temps, elles "renoncent" à cet atome. Ce dernier devient un nouvel atome O libre, qui s'associe à un semblable pour créer une molécule d'O_2… alors que l'halogène redevient disponible pour détruire de l'ozone – il s'agit donc d'une réaction catalytique. A cette régénération des halogènes, il faut ajouter que les halocarbones ne réagissent pas dans la troposphère – où ils sont par contre lessivés en partie par les pluies. En moyenne, le temps de vie des halocarbones et halogènes est important (il peut même dépasser le siècle pour certains composés) ; par conséquent, leur pouvoir de nuisance sur l'ozone est potentiellement très important, même dans le cas d'émissions relativement faibles. [*cf.* Molina & Rowland, 1974]

Des conflits disciplinaires

La science de l'ozone des années 1970 souffre de deux grandes faiblesses. D'abord, l'absence de mesures empiriques montrant une baisse d'ozone. Ensuite, la quasi-absence de modélisations de chimie-transport à 2 ou 3 dimensions, c'est-à-dire de modèles pouvant simuler efficacement, à la fois la chimie de l'ozone, et le transport latitudinal et longitudinal des composés atmosphériques (simulation du transport que les modèles météorologiques réalisent à l'époque à peine mieux). En outre, certains scientifiques de la recherche publique et de la recherche privée vont jusqu'à contester les constantes de réaction des experts officiels du CIAP établies en laboratoire… décrivant en définitive la destruction anthropique de l'ozone comme une simple théorie "nue", impossible à confirmer comme à réfuter.

Les controverses scientifiques sont alors vives, notamment entre champs disciplinaires, qui défendent chacun leur vision de l'atmosphère. Nous avons montré que ces controverses ne peuvent toutefois être réduites à une simple opposition chimistes / météorologistes, comme se sont contentés de le résumer la plupart des analystes (par exemple, Litfin, 1994, Chapter 3, p. 8 of 18). On trouve de nombreux météorologistes parmi les experts du CIAP, qui s'entendent en 1975 sur un consensus au sujet de la pertinence de la théorie de Molina-Rowland à décrire la chimie stratosphérique et, par conséquent, au sujet de l'urgence à plafonner – par précaution, dans l'attente d'en savoir plus – les émissions de CFC, dont les mesures indiquent qu'ils s'accumulent dans l'atmosphère. Réciproquement, J. Lovelock, qui est un chimiste de formation, refuse de prendre au sérieux l'hypothèse de Molina-Rowland, tout en insistant sur l'importance d'étudier la réactivité chimique de la troposphère, décisive selon lui pour en comprendre la composition.

Quant aux aéronomes, nombre d'entre eux adoptent une attitude circonspecte jusqu'à ce que le trou de la couche d'ozone d'origine anthropique commence à faire l'objet d'un relatif consensus, dans la seconde partie des années 1980 (après que la corrélation entre déclin de l'ozone en Antarctique et émissions de CFC à l'échelle pluri-décennale aura été établie par plusieurs équipes de recherche (voir Chapitre 7)). Certains aéronomes, comme Paul Crutzen, ont toutefois soutenu les lanceurs d'alerte très précocement. Alliés à des « 'outsiders' » qui n'étaient pas spécialisés dans l'étude de la stratosphère (des chimistes de laboratoire, des météorologistes, des modélisateurs du temps et du climat, des géophysiciens, des scientifiques des atmosphères planétaires), ils ont participé à l'expertise du CIAP et à la construction d'un champ de recherche interdisciplinaire sur l'ozone.

Comme l'a fait remarquer l'un des acteurs de l'expertise états-unienne de l'ozone dans les années 1970, Harold Schiff, rares sont les chercheurs des débuts de la recherche sur la destruction de l'ozone qui ont été des « membres de la clique de chercheurs qui avaient

choisi la chimie stratosphérique comme spécialité ». Les 'outsiders' jouent alors un rôle crucial dans l'identification des menaces sur la couche d'ozone. Peter Haas a suggéré que « leur statut institutionnel de petit groupe de scientifiques [, regroupés au sein du CIAP ou à Boulder)], en-dehors de la communauté 'mainstream' – au sens de Michael Polanyi –[419] des scientifiques de l'atmosphère, avait [pu] renforc[er] leur identité collective [Dotto & Schiff, 1978, pp. 11-16 ; Haas, 1992 (2), pp. 192-193]. Cette description comporte une part de vérité, mais elle est trop schématique. Que l'on pense, par exemple, au rôle nodal de Paul Crutzen, qui ne peut pas être qualifié d''outsider' ; que l'on pense aux échanges nombreux entre M. Nicolet et ses collègues états-uniens pour écrire son rapport COVOS [Nicolet, 1978] ; *etc.*

Par contre, il est indéniable que l'ozone a été rendu scientifiquement attractif par l'importante médiatisation des débats aux Etats-Unis (… une médiatisation qui a été créée initialement plus ou moins sur un malentendu, puisque, en 1971, le programme SST états-uniens n'aurait jamais été stoppé sur la simple base du risque qu'il pouvait faire courir à la couche d'ozone). Au lendemain de l'expérience CIAP (1971-75), profitant de l'afflux de scientifiques dans la science de l'ozone stratosphérique, P. Crutzen cherche à attirer de nouveaux scientifiques vers la chimie atmosphérique. Et, de retour en Europe, il crée en 1983 la première revue consacrée à la chimie atmosphérique. Au cours de cette même période, Crutzen encourage en outre de premières initiatives en faveur d'une construction d'une physico-chimie plus holiste de l'environnement global. P. Crutzen et J. Lovelock, "adversaires" au sujet de l'hypothèse de la destruction anthropique de l'ozone dans les années 1970, se rejoignent dans ce projet de "science du système Terre", auquel la médiatisation et la politisation du trou de la couche d'ozone et du changement climatique allaient donner un élan décisif à la fin des années 1980.

L'instabilité politique avant la mise en place d'une gouvernance technique

Dans les années 1970, l'attitude affichée, "institutionnalisée" des gouvernements nationaux occidentaux de s'attaquer à la problématique des pollutions atmosphériques coïncide avec un contexte de crise économique, lié aux chocs pétroliers et à des délocalisations d'activités industrielles. Cette crise génère des discussions vives entre les économistes. Au même moment, la crise environnementale et la mise en place de ministères de l'environnement avivent un autre clivage disciplinaire : celui entre les physiciens préoccupés par l'augmentation inexorable des pollutions atmosphériques, et les économistes dominants. Les premiers accusent les seconds de légitimer la faiblesse de l'action des gouvernements en

[419] En 1962, dans l'article "The Republic of Science: its Political and Economic Theory", Michael Polanyi avait donné des exemples montrant que la situation de marginalisation des chercheurs pouvait créer entre eux un fort esprit de communauté et de "conquête". [Polanyi, 1962]

matière de pollution. Certains physiciens rejoignent ainsi dans leur lutte des économistes "aux vues alternatives" (les membres du Club de Rome, par exemple), et surtout des biologistes-écologues (dont les auteurs de *Nous n'avons qu'une terre* (Ward & Dubos, 1974 (1972)))[420].

Le météorologiste Richard Scorer, sur lequel nous nous sommes longuement attardé, incarne une prise de parole précoce (et véhémente !) d'un physicien, garant de la rationalité objective sur les limites de l'environnement, contre des économistes préoccupés par des grandeurs qui entrent en conflit avec cette rationalité (par exemple, une croissance économique galopante), ou qui négligent des grandeurs décisives de cette rationalité (des "externalités négatives"). De nombreux physiciens ont, depuis, encouragé la fronde contre les "économistes ultra-libéraux" (… alors que d'autres physiciens, tels que les « marchands de doute » désignés par Oreskes et Conway, montraient au contraire leur sympathie pour ceux-ci [Oreskes & Conway, 2010]). Au cours d'une émission radiophonique diffusée le 26 mars 2014 (*France Culture, Planète Terre*), l'ingénieur conseil Benoît Thévard déclarait : « On atteint [aujourd'hui] une limite physique » du système de production d'énergie, ainsi que de la capacité de l'environnement à se montrer résilient aux émissions de GES. Ce qui inspira au physicien (de la physique nucléaire) Jean-Louis Bobin, Professeur émérite à l'Université Pierre et Marie Curie (Paris), le constat suivant : « On a assisté jusqu'à maintenant à une domination de l'économie : c'est l'économie qui finit toujours par décider à la fin… Alors, est-ce qu'il va y avoir un changement de paradigme à ce niveau-là, […] est-ce que c'est sur les [raisons] énergétiques [et environnementales] que les décisions vont [désormais] se prendre ?… C'est pour moi une question ouverte. » [Kahn (Prod.), 2014]

A la fin des années 1970, l'un des doyens des écologistes nord-américains, Eugene Odum, n'a toujours pas baissé la garde face aux scientifiques de l'environnement physique. Il critique encore les approches simplificatrices des physiciens, en martelant que « dépasser le réductionnisme pour le holisme est désormais un impératif, si science et société veulent s'accorder en vue d'un bénéfice commun, stopper la détérioration des écosystèmes » [Odum, 1977 **in** Doel, 2009, p. 140]. Pourtant, à partir des années 1970, les physico-chimistes de l'atmosphère ont entre leurs mains un outil extrêmement puissant de mobilisation en faveur

[420] Comme nous l'avons rappelé dans l'Introduction générale, auparavant (au cours des années 1945-70), les discours sur les limites de l'environnement au sein de la communauté scientifique avaient été la chasse gardée des biologistes-écologues. Les « scientifiques de l'environnement biologique » avaient été les plus présents dans les luttes pour la protection de l'environnement (aux côtés notamment des historiens de l'environnement, avec lesquels ils partageaient une sympathie profonde à l'égard des perspectives holistes et, aux Etats-Unis, la même méfiance envers des physiciens associés à la guerre du Vietnam ou à la course à l'armement nucléaire) ; ceci, loin devant les « scientifiques de l'environnement physique », dont les scientifiques de l'atmosphère. [Doel, 2009, pp. 137-140 ; Mahrane *et al.*, 2012, pp. 128-130 ; Howe, 2010]

de l'environnement. A la faveur de l'afflux de budgets pour travailler sur l'environnement physique dans les années 1950-60, ils se retrouvent en mesure de présenter des modélisations empiriques ou des courbes empiriques d'évolutions inquiétantes de l'environnement global.

La courbe de croissance des concentrations de CO_2 atmosphérique de C. Keeling, par exemple, figure dans les grands rapports SCEP et SMIC préparés dans l'optique de la Conférence UNCHE de Stockholm. Lors de la conférence elle-même, la courbe de Keeling, certes encore soumise à caution et qui ne montrait pas le lien entre accumulation du CO_2 et changement climatique, est présentée. Elle côtoie les figures tendant à démontrer la disparition des baleines et à justifier un moratoire sur la chasse à la baleine. L'homme d'affaires canadien Maurice Strong, secrétaire général de l'UNCHE, apporte en personne son soutien au moratoire, dans un discours qui se referme sur un court poème soi-disant écrit par une baleine, et dont la lecture fut accompagnée de force gémissements et grognements. De façon moins insolite, en juin 1973, lors du premier conseil de l''UNEP Governing Council', le même M. Strong décrit « la couche d'ozone » comme une « limite extérieure ('outer limit') » ; si l'on « ouvre une brèche » dans celle-ci, prévient-il, ceci « pourrait mettre en danger la perpétuation de la vie humaine sur la planète ». La courbe de Keeling et les premières théories sur la destruction de la couche d'ozone répondent aux courbes d'extinction d'espèces emblématiques chez les biologistes, ou encore aux simulations numériques du Club de Rome qui annoncent que l'"overshoot" en cours doit inévitablement conduire à un "collapse" prochain. [Howe, 2014, pp. 74-89 ; Strong, 1973 (juin) **in** Andersen & Sarma, 2002, p. 199]

Toutefois, il faudra attendre le milieu des années 1980 pour que soient brandies des courbes empiriques plutôt consensuelles corrélant hausse du CO_2 et hausse des températures globales, et émissions de CFC et destruction d'ozone. Dans les années 1970, non seulement Richard Scorer est l'un des seuls à se rapprocher de mouvements environnementalistes militants ("décroissantistes", néo-ruraux, *etc.*), mais rares sont les atmosphériciens préoccupés par les dangers environnementaux sur le long terme. Nous avons, toutefois, identifié B. Bolin et "l'école scandinave" (au sujet des émissions acides et des GES), ou encore J. Lovelock (au sujet des GES).

En ce qui concerne les Etats-Unis, notre étude de controverse de l'ozone va dans le sens des conclusions de J. Howe (dont le travail porte surtout sur les climatologues) : quelle que soit la sous-discipline à laquelle ils appartiennent, la grande majorité des scientifiques de l'atmosphère des années 1970 ne sont pas prêts à agiter le drapeau rouge de la catastrophe globale. Au tournant des années 1970, en tout cas, les atmosphériciens privilégient un cadrage très technique : les problèmes peuvent se résoudre en négociant calmement avec les industriels, secteur par secteur. Les 'leaders' de la discipline sont manifestement « moins

radicaux que certains de leurs homologues de la physique des particules et de la biologie », écrit J. Howe (par exemple, « la plupart des scientifiques de l'atmosphère qui travaillèrent initialement sur les effets atmosphériques des SST ne le firent pas dans le but de saper le projet, mais […] de réduire ces effets ») [Howe, 2010, pp. 79-111].[421] Par contre, il est manifeste que l'affaire des CFC dans les années 1974-78 commence à faire bouger des lignes. De plus, la mobilisation du principe de précaution comme justification des réglementations de CFC aux Etats-Unis crée un antécédent qui sera important après l'annonce de la formation d'un trou de la couche d'ozone au-dessus de l'Antarctique en 1985.

Quid des Européens, à présent ? Il est frappant de voir le contraste qui existe entre les pays du nord de l'Europe et les pays les plus industrialisés du Continent, aussi bien en matière d'intérêt scientifique pour les pollutions atmosphériques que d'action politique… Mais, les "Ecoles" scandinave(s), nord-américaine(s), française(s), britannique(s) présentent manifestement de grandes disparités. Aussi faudrait-il mener des études de cas nationales plus spécifiques que la nôtre, afin de décrire plus finement "l'engagement militant" des scientifiques de l'atmosphère et les raisons des mutations de politiques de recherche sur l'atmosphère dans les années 1970 et au début des années 1980. Il faudrait, en outre, travailler spécifiquement sur les débats d'alors entre scientifiques, au sujet des pollutions de l'air urbain et de la mise en place de normes de qualité de l'air (débats que R. Scorer a, là encore, animés).

Qu'en est-il, à présent, de la « technocratie » que dénonce R. Scorer ? Dans son article publié en 1975 dans *New scientist*, consacré principalement aux "marchands de peur" sur la destruction de l'ozone, Scorer écrit : « les pouvoirs publics financent la recherche comme si elle était un exercice d'ingénierie dont on attendait avec confiance qu'elle accomplisse un dessein [– entre autres choses, celui de résoudre] les problèmes environnementaux » [Scorer, 1975, p. 702]. Il est patent que les années 1970 sont marquées par la création d'agences et ministères nationaux, qui vont désormais être chargés de gérer durablement les pollutions atmosphériques ; par contre, il nous semble que, lorsque Scorer réitère sa critique de la technocratie dans le cadre de la controverse de l'ozone en 1975, il est quelque peu hors sujet (… même si, soyons juste avec Scorer, les critiques qu'il formule à l'encontre des scientifiques et des pouvoirs publics défendant la couche d'ozone concernent surtout « l'urgence » à légiférer dans un contexte où la science de la destruction de l'ozone n'en est qu'à ses

[421] Finalement, juge J. Howe, c'est seulement dans les années 1980, lorsque « l'environnementalisme lui-même devint global et plus scientifique [, et à la faveur de la multiplication des problèmes atmosphériques spectaculaires (smog, pluies acides, changement climatique, trou de la couche d'ozone, accidents industriels de Bhopal (1984) et Tchernobyl (1986), *etc.*)], que les changements atmosphériques devinrent une inquiétude centrale des professionnels [scientifiques] de l'environnement. » Et que les scientifiques de l'atmosphère donnèrent le primat aux études sur les dangers environnementaux d'origine anthropique (y compris globales). [Howe, 2010, pp. 110-111]

balbutiements – et non, quelque confiscation du pouvoir démocratique par une élite technocrate).

Quoiqu'il en soit, les décisions politiques prises au cours des controverses sur l'ozone (arrêt du programme SST et premières réglementations, marginales, des CFC) nous semblent prises dans une urgence et une désorganisation qui tranchent avec l'image d'une technocratie qui verrouillerait les décisions sur la base d'avis d'experts savamment choisis, et qui maîtriserait sa communication dans les médias. La pratique d'une science « post-normale », pour parler comme S.O. Funtowicz et Jerome Ravetz, n'est pas encore entrée dans les habitudes [Funtowicz & R. Ravetz, 1991]. Il faudra attendre pour cela la fin des années 1980. En 1992, J. Theys et B. Kalaora pourraient alors écrire : « Interdisciplinarité […], conscience de l'ignorance, éthique de la responsabilité, souci de qualifier et d'objectiver la part d'appréciation nécessairement subjective qu'il y a dans toute connaissance de l'environnement : le paradoxe est que c'est probablement de cette science « post-normale » (ou « post-cartésienne ») qui est le mieux à même de préserver la crédibilité des scientifiques face au risque d'un engagement dans l'expertise, c'est-à-dire aussi de la politisation de la science » [Theys & Kalaora, 1992, p. 33]… La situation est tout autre dans les années 1970. En particulier, dans un contexte des années 1970 où l'interdisciplinarité autour des questions de pollution atmosphérique est embryonnaire, l'Industrie exploite les controverses entre disciplines (soulignant, avec les météorologistes, le caractère unidimensionnel des modèles numériques ; rappelant, avec les géologues, que les volcans injectent eux aussi du chlore dans la stratosphère sans que personne ne s'en émeuve). Et, dans ce même contexte où les incertitudes ne font guère partie de la culture de l'opinion américaine, l'Industrie chimique, pourtant toujours avide de nouvelles innovations (donc génératrice de nouveaux risques), joue, paradoxalement, la carte des sciences mûres contre la science juvénile de l'ozone.

Ajoutons que la situation états-unienne doit être comprise à l'aune de l'antécédent SST, ou encore de l'attractivité que pouvait présenter un programme sur l'ozone pour des scientifiques de la NOAA et de la NASA (car, il s'agissait d'une nouvelle raison de lancer des satellites ; et, en outre, une voie nouvelle s'ouvrait pour les astronomes, qui étaient en train de perdre des financements, et pouvaient espérer réorienter leurs activités de la planétologie comparée vers l'expertise sur l'ozone, le changement climatique, et plus généralement l'estimation des modifications physico-chimiques de l'environnement global). Comme nous l'avons montré, la situation ouest-européenne était tout autre (même si l'ozone offrit un programme non belligérant attrayant, à partir de la fin des années 1970).

En revanche, comme nous le montrons dans le Chapitre 7, une technocratie de l'ozone prend forme à partir des années 1970. Les craintes de Scorer vont se confirmer, avec les

gouvernances de l'ozone et des pluies acides dans les années 1980. Non, le problème ne serait pas de trouver des organisations de société nouvelles, où le citoyen se sentirait pleinement concerné par des problématiques de court terme comme de long terme. Non, les CFC ne seraient, ni un problème de suremballage, ni un problème de surexploitation de la filière pétrolière (les CFC sont des produits de la chimie organique, rappelons-le), pas plus que la baisse des émissions de SO_2 et des NO_x n'appelleraient à repenser le problème des transports ou le modèle de production industrielle. Oui, les scientifiques de la nature et les économistes deviendraient à temps partiel des "ingénieurs" de l'environnement, et seraient même amenés à coopérer avec les économistes, fournisseurs de scénarios d'émissions, injectés dans leurs modèles d'expertise des pluies acides, de l'ozone, du changement climatique, de la qualité de l'air, à partir des années 1980. Oui, les scientifiques de l'élite de la recherche publique se chargeraient de faciliter les médiations avec l'industrie, en acceptant d'intégrer des modélisations des chercheurs de l'industrie dans les grands rapports internationaux onusiens qu'ils dirigeraient, et en travaillant avec eux autour de la construction de substituts technologiques (notamment, par le biais d'un travail autour d'indices environnementaux 'ad hoc', tels que l'ODP pour l'ozone stratosphérique) (voir Partie C, et en particulier le Chapitre 7).

En outre, les critiques de l'inefficacité de l'approche des politiques de pollutions formulées par R. Scorer redeviendront pleinement d'actualité dans les années 1990, lorsque la gouvernance du changement climatique, pourtant calquée sur la gouvernance "à succès" de l'ozone, se montrera parfaitement incapable d'atteindre les objectifs fixés par les experts du GIEC… Toutefois, qu'il s'agisse des normes (de qualité de l'air, par exemple) ou des futurs scénarisés, qui prolifèreront et se diversifieront dans les années 1990-2000, ils pourront alors plus que jamais jouer le rôle, non seulement d'outils "de domination", mais également de plaidoyers en faveur d'un modèle alternatif aux gouvernances des pollutions atmosphériques en place, manifestement peu efficaces.

Partie C. *1977-2013*. Une expertise internationale, entre couche d'ozone, changement climatique et qualité de l'air

> « Or, pareil système planétaire conçu comme une unique communauté humaine créatrice et responsable est encore à naître. Et il y a plus ici que le grossier égoïsme des riches vis-à-vis des pauvres ! On se heurte en effet au paradoxe que représente le rôle de la *nation* dans le monde moderne : apparue historiquement comme l'institution la plus importante, elle est devenue pour les pays du Tiers Monde le symbole le plus profond de leur libération de l'esclavage, l'unique base de dignité, d'identité et de volonté politique active sur lesquelles ils puissent fonder leur urgent besoin de réalisation et de développement. Or, il faudrait corriger cette vision trop étroite par le principe de la très large interdépendance physique et technique des peuples. Nous en sommes encore trop souvent à la prise de décision séparée, alors qu'il serait urgent de combiner la conception de l'unité et de l'interdépendance essentielle de la technosphère et de la biosphère, avec la souveraineté de plus de 130 gouvernements qui ont chacun une conscience aiguë de leur individualité nationale. »
>
> Ward & Dubos (Dir.), 1972

Dans la Partie B, nous avons décrit l'élargissement de la communauté d'étude sur la chimie atmosphérique à grande échelle et globale dans les années 1970 et au début des années 1980. Il correspond à une intensification des collaborations transdisciplinaires entre des chimistes, des aéronomes, des météorologistes, des scientifiques de la planétologie comparée, des géophysiciens et géochimistes, des biologistes-écologues. Ces coopérations se font autour de la chimie stratosphérique (pollutions anthropiques par les SST et les CFC, rejets volcaniques dans la stratosphère), mais aussi autour de nouvelles problématiques transfrontières, transcontinentales et globales : échanges d'ozone et de NO_x entre troposphère et stratosphère ; trajets et réactivité des pollutions troposphériques soufrées, azotés, du méthane, *etc.* ; cycles biogéochimiques ; impacts du changement climatique d'origine

anthropique sur la réactivité de la troposphère et « l'équilibre » biosphère / atmosphère (*cf.* Lovelock, 1971).

Au cours des décennies 1970-80, des climatologues apportent leur contribution à la science de l'ozone. Réciproquement, des chimistes de l'ozone se familiarisent avec la problématique du changement climatique. Susan Solomon, Robert Watson et Donald Wuebbles compteront parmi les auteurs du premier rapport du GIEC (1990). On retrouve, à leurs côtés, des chimistes de la troposphère, en particulier les scientifiques qui ont initié les études sur la chimie troposphérique dans une perspective continentale voire globale, soit en "faisant monter en échelle" les études sur les polluants transfrontières (SO_2, NO_x), soit en étudiant le devenir de gaz émis en grande quantité dans l'atmosphère, en partie en lien avec des activités humaines (CH_4, CO), soit en étudiant les échanges d'ozone entre troposphère et stratosphère. [*IPCC (WG I)*, 1990 ; Logan *et al.*, 1981]

Dans les années 1970 et au début des années 1980, on observe de grandes variabilités entre les résultats des travaux relatifs aux impacts de l'homme sur la couche d'ozone et le climat global. A partir de la fin des années 1970, la construction d'une expertise internationale sur la destruction de l'ozone s'institutionnalise. Un modèle pérenne s'impose à la fin des années 1980, avec la parution d'un premier 'Assessment of Ozone Depletion' en 1989. Un processus semblable est mis en place pour le changement climatique. Le GIEC, créé en 1988, publie son premier rapport en 1990.

Parallèlement à ce processus de construction d'expertises internationales sur l'ozone et le changement climatique, un procès diplomatique s'est enclenché afin de cheminer vers des politiques de contrôle des composés destructeurs d'ozone (ODS, 'Ozone Depleting Substances') et des GES (et, en particulier, du CO_2). Des gouvernances internationales de l'ozone et du changement climatique prennent forme dans la seconde moitié des années 1970 et la première moitié des années 1980. Elles se caractérisent toutes les deux par : la rédaction de rapports par trois groupes d'experts, publiés conjointement tous les trois à sept ans (les 'Assessments of Ozone Depletion' et les rapports du GIEC, respectivement) ; l'organisation de "forums hybrides", lieux des négociations entre signataires de Conventions internationales (la Convention de Vienne de 1985 et l'UNFCC de 1992, respectivement), les COP ('Conference of the parties'), et entre les signataires de Protocoles (Montréal (1988) et Kyoto (1997), respectivement), les MOP ('Meeting of the parties'). La comparaison ne s'arrête pas à cet aspect institutionnel, comme nous le verrons avec l'exemple de l'indice ODP ('Ozone Depletion Potential'), qui servit de modèle au GWP ('Global Warming Potential').

L'homologie des expertises et gouvernances entre ozone et changement climatique n'a pas manqué d'interpeler les auteurs en sciences humaines et sociales. Dans le contexte des années 2000 où la gouvernance climatique internationale était violemment attaquée, plusieurs auteurs ont désigné cette « dépendance au sentier » comme l'une des coupables de sa morosité [Grundmann, 2006 ; Prins *et al.*, 2010]… alors que certains scientifiques de l'atmosphère continuaient à marteler que la gouvernance de l'ozone était l'exemple à suivre [Molina, 2010] et que de nouveaux enseignements pouvaient encore être puisés dans cette expérience "heureuse" [Solomon *et al.*, 2013 ; Daniel *et al.*, 2012].

Dans cette Partie C, nous analysons les liens entre les expertises de l'ozone et du changement climatique. Plus généralement, nous mettons en lumière les questions politiques que (re)formulent et mettent en avant les chimistes de l'atmosphère au sein du régime climatique. En particulier, l'accent mis par les chimistes de l'atmosphère sur les GES de faible durée de vie. Le cœur de notre corpus est occupé par les rapports d'expertise internationale dits « scientifiques » sur l'ozone (grand rapport de 1985 (*NASA/…*, 1985), puis 'Scientific Assessments of Ozone depletion') et sur le changement climatique (rapports du 'Working Group I' du GIEC), qui se sont imposés comme les textes de référence au sein de la communauté scientifique et dans l'arène politique.

Nous souhaiterions apporter des éléments de réponse aux quatre questions suivantes :

1) Par quels facteurs la reproduction du modèle d'expertise de l'ozone dans le régime climatique a-t-elle été facilitée ?
2) Quelle a été la contribution du Protocole de Montréal dans les réductions de GES, induites comme co-bénéfices à la réglementation des CFC et des HCFC – qui sont des composés destructeurs d'ozone (ODS), mais également des GES puissants ?
3) Quelle place la chimie atmosphérique occupe-t-elle dans les rapports du GIEC ? ; et, quels sont les enjeux politiques des rétroactions chimie-climat ?
4) Quelles sont les pistes aujourd'hui explorées par les chimistes de l'atmosphère, afin de "venir en aide à" une gouvernance du changement climatique en échec ? En particulier, quelles sont les implications politiques des discussions autour des GES de courte durée de vie, sur lesquels certains chimistes de l'atmosphère mettent aujourd'hui l'accent ?

Le premier chapitre (7) de la Partie C décrit la création d'un modèle d'expertise internationale au sujet de la destruction de l'ozone stratosphérique (1977-89). Le Chapitre 8 expose les enjeux politiques de recherche scientifique à l'interface chimie-climat, dans les 'Scientific Assessments of Ozone depletion' et les rapports du GIEC. Dans un dernier

chapitre (9), nous introduisons plus spécifiquement aux débats "entre qualité de l'air et changement climatique" autour des GES de courte durée de vie et des émissions soufrées.

Chapitre 7. L'expertise internationale sur l'ozone comme expérience fondatrice

Alors que la controverse sur les CFC aux Etats-Unis se clôt en 1977-78, un processus onusien de coopération internationale s'enclenche. Un nouvel acteur émerge. L'UNEP ('UN environment programme' ; 1972-…), jeune institution onusienne en quête de reconnaissance, fait de la protection de la couche d'ozone, cause "globale", l'une de ses priorités [Andersen & Sarma, 2002]. L'UNEP organise la première grande rencontre transnationale et "hybride" sur la couche d'ozone. Elle se tient à Washington en mars 1977. Elle réunit des experts de trente-deux pays, des membres des quartiers généraux de l'ONU, des représentants de la FAO ('Food and Drug Administration'), de l''International Civil Aviation Organization' (ICAO), de l''UN Educational', de l'UNESCO, de l'OMM, de l'OMS, de la CEE, et enfin des émissaires de deux ONG : l''International Chamber of Commerce', qui représente l'industrie, et le Comité SCOPE de l'ICSU. La rencontre de Washington marque, d'une part, le lancement d'un programme de recherche scientifique multi-agences et transdisciplinaire, qui vise à regrouper et étendre les connaissances sur les émissions d'ODS, les évolutions des tendances d'ozone, et leurs impacts ; d'autre part, elle est le lieu de premières prospections sur les conséquences socio-économiques de diverses, hypothétiques modalités de contrôle des ODS à l'échelle internationale.

La rencontre de Washington débouche sur un accord : la création d'un 'World Plan of Action' sur la couche d'ozone. Suivant les recommandation du Plan, l'UNEP établit un 'Coordinating Committee on the Ozone Layer' (CCOL ; 1977-86). Le comité regroupe les délégués des institutions présentes à la réunion de Washington, ainsi que des représentants de treize pays industrialisés, de trois pays en développement et de l'OCDE. Le CCOL se réunira désormais une fois par an. Chaque rencontre sera suivie quelques mois plus tard par la publication d'un *UNEP Ozone Layer Bulletin* (1978-85).

Les rencontres ritualisées du Comité de coordination sont une occasion – parmi d'autres – de mutualiser les conclusions scientifiques sur l'ozone. Elles sont surtout un lieu où se créent de premiers échanges diplomatiques. En 1982, « l'harmonisation » internationale des réglementations sur les CFC, pour reprendre le terme des négociateurs, est officiellement mise à l'agenda politique. La première rencontre de l''Ad hoc Working Group of Legal and technical Experts for the Elaboration of a Global Framework for the Protection of the Ozone Layer' est organisée par l'UNEP à Stockholm en janvier 1982. La dernière réunion du 'Working Group' se déroule à Vienne en janvier 1985, préludant à la conférence des

plénipotentiaires des 18-22 mars 1985. Les grandes nations industrialisées signent à cette occasion la Conférence de Vienne « pour la protection de la couche d'ozone ». "Restera", dès lors, à négocier un protocole international qui dictera des objectifs de réduction des émissions d'ODS. [Andersen & Sarma, 1982, pp. 42-66]

Le lecteur sera peut-être surpris par le fait que nous ne consacrions qu'un unique, court chapitre à la période 1977-92. Il est vrai que ce moment a été décisif sur un plan politique, avec la signature du Protocole de Montréal (1987). C'est également au cours de cette période qu'est née l'icône environnementale « trou de la couche d'ozone ». Mais, il existe déjà de nombreuses, riches études de SHS au sujet de ces années 1977-1992. C'est le cas en ce qui concerne la construction scientifique des images du trou de la couche d'ozone, les expéditions scientifiques de 1986-87 en Antarctique, ainsi que le programme théorique d'élaboration d'une chimie hétérogène des nuages stratosphériques polaires (Christie, 2000 ; Grevsmühl, 2012 ; Conway, 2008). C'est également le cas en ce qui concerne les tractations politiques entre 1985 et 1992, période des négociations du Protocole de Montréal et de ses premiers amendements (Andersen & Sarma, 2002 ; Parson, 2003 ; Haas, 1992 (2) ; Liftin, 1994 & 1995).

Les deux derniers auteurs cités, Peter Haas et Karen Litfin, ont adopté des approches différentes mais complémentaires pour décrire l'action politique des scientifiques de l'ozone dans les années 1980. D'un côté, P. Haas montre qu'une « communauté épistémique écologique ('ecological epistemic community') » se constitue à partir de la fin des années 1970. Ce groupement circonstanciel d'acteurs, possédant des formations professionnelles très contrastées et travaillant pour des institutions très diverses, partagent « (1) un ensemble de croyances normatives et principielles », « (2) des croyances causales » (une croyance dans la véracité de la théorie Molina-Rowland, notamment), « (3) des notions de validité », et « (4) une entreprise politique commune » : la défense de la couche d'ozone. Parmi eux, des scientifiques de l'ozone, dont R. Watson et R. Stolarski, de la NASA [Haas, 1992 (2) & 1991 (1), p. 3]. De l'autre côté, toujours selon une « approche réflexive de la prise de décision politique » (« par opposition à des approches théoriques du monde politique, qui définissent les buts et intérêts en termes de conditions matérielles objectives – le néoréalisme, l'institutionnalisme et le Marxisme »), Karen Litfin propose de remettre au centre du jeu « les dimensions *discursives* de la connaissance ».[422] Dans *Ozone Discourses* (1994), K. Litfin décrit

[422] K. Litfin juge que « les auteurs travaillant sur les communautés épistémiques », tels que P. Haas, ne s'attardent pas suffisamment sur les dimensions « discursives », dialogiques, rhétoriques. Toutefois, l'auteure de *Ozone Discourses* reconnaît que les deux approches sont complémentaires ; aussi, propose-t-elle « que les approches sur les communautés épistémiques soient complétées par une attention aux manières dont les pratiques discursives font la promotion de récits spécifiques au sujet des problèmes sociaux. Alors qu'une approche sur les communautés

finement la mobilisation de certains savoirs scientifiques particuliers et du principe de précaution lors des négociations de la seconde moitié des années 1980. Elle met aussi en relief le travail de coopération entre experts scientifiques et industriels, et les points de tension entre eux [Litfin, 1994].

Ce Chapitre 7 porte sur les premiers pas de l'expertise internationale sur la destruction anthropique de l'ozone. Il se veut principalement une mise en récit personnelle à partir de la littérature secondaire (vers laquelle nous redirigeons fréquemment le lecteur désireux de connaître de plus nombreux détails et points d'analyse). Notre étude est toutefois originale, dans la mesure où nous nous sommes plongé dans la lecture des premiers rapports internationaux sur l'ozone, et nous avons analysé en détail le rôle d'indices environnementaux (ODP, charge en chlore, GWP).

Notre Sous-chapitre 7.1 décrit la construction d'une expertise d'un nouveau type. Elle réunit les meilleurs spécialistes mondiaux de l'ozone, et se veut la plus internationale possible. Elle aspire à une 'sound science' qui s'appuierait sur de nombreuses mesures de laboratoire et, surtout, sur de très nombreuses et trans-instrumentales mesures 'in situ'. Elle intègre la recherche privée. Elle réalise des simulations intégrées sur la base de scénarios d'économistes. Elle élabore des indices environnementaux (l'ODP, la charge en chlore, le GWP).

Notre Sous-chapitre 7.2 rappelle rapidement l'importance qu'a jouée l'annonce du trou de la couche d'ozone antarctique en pleines négociations du Protocole de Montréal. Les célèbres "images du trou de la couche d'ozone" communiquées par la NASA, notamment, donnèrent une force sans précédent au principe de précaution. Nous soulignons, par ailleurs, que "le déplacement de la question de la destruction de l'ozone vers les pôles" requit la construction d'une nouvelle théorie chimique de l'ozone. La signature du Protocole de Montréal et de ses amendements ne se fit pas dans le contexte idéal qui a souvent été dépeint, mais dans un climat de controverse scientifique et de tensions diplomatiques. Le 'leadership' politique des Etats-Unis joua un rôle incontestable dans le dénouement "heureux" des négociations [Grundmann, 2006]. La coopération de longue haleine engagée entre scientifiques et industriels états-uniens, également.

épistémiques met l'accent sur les agents de l'information, écrit-elle, une approche discursive souligne les cadrages sémantiques ('frameworks of meaning') ». [Litfin, 1995, pp. 251-252]

7.1. L'expérience scientifique et politique de construction d'une expertise internationale sur l'ozone (1977-1989)

L'année 1985 est marquée par la publication de séries de mesures indiquant l'existence d'un "trou de la couche d'ozone" antarctique, c'est-à-dire d'une diminution importante d'ozone au-dessus du pôle antarctique d'une année sur l'autre, établie empiriquement [Farman *et al.*, 1985]. L'année 1985 est également celle de parution du premier grand rapport d'experts internationaux sur l'ozone (*NASA/UNEP/WMO/…*, 1985), qui marque la création d'un nouveau type d'expertise internationale sur les pollutions atmosphériques. Dans ce premier Sous-chapitre, nous décrivons la construction de ce rapport ; de même que, plus généralement, la construction d'une mobilisation scientifique et politique internationale dans les années 1977-85 (toujours centrée sur nos acteurs, les chimistes de l'atmosphère). En effet, si pendant cette période 1977-87, l'affaire de l'ozone reflue grandement dans la sphère médiatique, nous montrons que cette période n'en est pas moins décisive pour la suite de la gouvernance de l'ozone, dans la mesure où elle est le lieu des premiers pas de la diplomatie internationale de l'ozone pendant ces années dans les CCOL ; et surtout, en ce qui nous concerne, un nouveau type d'expertise émerge alors.

Les principaux protagonistes de l'expertise et des négociations internationales sur l'ozone au cours de ces années sont états-uniens. Une première raison tient dans la puissance technologique de la recherche américaine. Certes, au tournant des années 1980, de nombreux théoriciens de l'ozone influents demeurent des Européens. Mais, l'avantage pris par la recherche états-unienne est patent : d'abord, en matière de développement des modèles numériques, qui impliquent de posséder des ordinateurs puissants (que l'on trouve notamment au LLNL et au NCAR) ; ensuite et surtout, sur un plan instrumental, puisque la recherche états-unienne se trouve en capacité de déployer des technologies multiples, dont les plus coûteuses, pour mesurer les paramètres importants dans la science de l'ozone (elle a même, avec la NASA et la NOAA, la capacité de pouvoir réaliser des mesures satellitaires) ; enfin, les Etats-Unis ont attiré dans leurs laboratoires de nombreux chercheurs européens, et certains y demeurent après la clôture de la première controverse sur les CFC (1974-78).

Au début des années 1980, Robert Watson développe à la NASA une stratégie transdisciplinaire et multi-instrumentale. Passé du 'Jet Propulsion Laboratory' au siège social de la NASA à Washington, où il a succédé en 1980 à Greenwood à la tête de l'UARP ('Upper Atmospheric Research Program' ; créé en 1976), « Bob » Watson cherche en outre à

faciliter la coopération et la coordination des équipes de recherche états-uniennes entre elles. Les laboratoires américains seront incontestablement la locomotive de l'expertise scientifique internationale sur la destruction anthropique de l'ozone dans les années 1980 [*NASA/…*, 1985 ; *WMO/…*, 1989 ; *WMO/…*, 1992] ; ceci demeurera le cas ultérieurement, même si la nationalité des équipes de recherche se diversifiera, et que les forces s'équilibreront quelque peu entre Etats-Unis et Europe [*WMO/…*, 1995 ; *WMO/…*, 1999 ; *WMO/…*, 2003 ; *WMO/…*, 2007 ; *WMO/…*, 2011].

Cette situation d'hégémonie de la recherche états-unienne a des implications politiques. En 1977, la gouvernance de l'ozone est entrée dans sa phase d'internationalisation. Or, elle est promue notamment par les Etats-Unis et les pays scandinaves, qui souhaitent "harmoniser" par le haut les réglementations des CFC, c'est-à-dire amener Allemands, Français, Britanniques, Japonais, Soviétiques, *etc.* à s'aligner sur les objectifs de réductions nord-américains et nord-européens, puis obtenir des réglementations plus ambitieuses. Or, il faudra pour cela que l'expertise de l'ozone se présente comme une science "universelle", "neutre", et non une science nord-américaine (et, dans une moindre mesure, scandinave). Les rencontres de l'OMM et de l'UNEP, et l'action personnelle de R. Watson, notablement, seront décisives dans la construction d'une expertise internationale sur l'ozone. Les rencontres du 'Coordinating Committee on the Ozone Layer' (CCOL ; 1977-86) organisées par l'UNEP seront, en outre, essentielles dans la construction d'une « communauté épistémique écologique » plus large, se reconnaissant dans des valeurs communes, et réitérant inlassablement la nécessité d'élargir les réglementations des ODS [Haas, 1992(2)].

L'instabilité des prédictions des modèles

Les années 1977-78 marquent un tournant dans l'histoire de l'ozone. Les premières réglementations états-uniennes de 1978 dessinent la clôture de la première controverse sociotechnique sur la destruction de l'ozone par les CFC. Le cadrage des débats sur l'ozone adopté dans les années 1970 aux Etats-Unis perdure en partie. Ainsi, à la fin des années 1970, la question de l'ozone continue à être posée principalement en termes de risque sanitaire. En outre, les remises en question du suremballage et du recours croissant à des produits manufacturés dérivés du pétrole (la plupart des substituts technologiques des CFC demeurent des produits de la chimie organique) sont marginales.

Des lignes ont néanmoins bougé dès le milieu des années 1970. Par exemple, écrivent N. Oreskes et E. Conway, « les Américains ont commencé à changer leurs habitudes » de consommation, en se dirigeant vers l'utilisation de substituts des CFC. Au moment où le directeur de la 'Food and Drug Administration' Donald Head annonce les premières

réglementations de CFC, en 1977, les propulseurs aux CFC ont déjà chuté aux trois quarts. « Le public avait réalisé qu'il existait de nombreux (et souvent moins onéreux) substituts des CFC, tels que les déodorants à bille et les bombes (ou pulvérisateurs) à détergents domestiques. L'interdiction de l'utilisation des propulseurs aux CFC, qui prit effet en 1979, ne fut que le coup de grâce ». [Oreskes & Conway, 2010, pp. 117-118]

Mais, dans le même temps, la stagnation voire le léger déclin de la consommation de CFC qui se fait bientôt sentir au niveau mondial à la fin des années 1970 et au début des années 1980, a également pour effet de *démobiliser* vis-à-vis du danger que représentent les ODS. Les scientifiques convaincus de la pertinence de l'hypothèse de Molina-Rowland hésitent à lancer de nouveaux appels à légiférer. La première raison tient au fait que, sur la base de nouvelles mesures (réalisées notamment à l'aide de LIDAR et de détecteurs de micro-ondes), un consensus s'est dégagé à la fin des années 1970 sur le fait que les chlores agissaient surtout autour de 40 kilomètres d'altitude. Par conséquent, les émissions de composés chlorés émis par l'homme engendreraient une destruction d'ozone moindre que prévue auparavant, pour des altitudes plus faibles, plus riches en ozone. Pour cette raison d'altitude et d'autres raisons scientifiques, la destruction d'ozone prédite par la plupart des modèles diminue de manière générale entre 1979 et 1983, par rapport aux prédictions antérieures.[423]

Lors des quatrième, cinquième et sixième séances du CCOL qui se tiennent en novembre 1980 (à Bilthoven), octobre 1981 (à Copenhague) et avril 1983 (à Genève), les experts annoncent en outre que les émissions de CFC sont en baisse (entre 1974 et 1980). Dans ce contexte d'édulcoration du risque et de forte instabilité de la science de l'ozone, les industriels états-uniens se sentent alors d'autant plus dans leur bon droit pour réclamer "plus d'expertise scientifique", et surtout "plus de mesures d'ozone *in situ* et de données de laboratoire".

Ajoutons à ces facteurs scientifiques d'autres éléments conjoncturels tendant à démobiliser au sujet de l'ozone à la fin des années 1970 et au début des années 1980 : les pourparlers autour des réglementation du SO_2 et des NO_X pour lutter contre les pluies acides et améliorer la qualité de l'air mobilisent prioritairement les ministères et agences européennes et états-uniennes dans les années qui suivent la signature de la Convention LRTAP (1978) ; aux Etats-Unis, l'administration reaganienne rechigne dans un premier temps à envisager de nouvelles réglementations sur les CFC (entre 1981 et 83, en particulier, alors que la directrice de l'EPA d'alors va dans la même direction) ; en Europe, les lenteurs

[423] Les prédictions de destruction de la couche d'ozone passèrent de 15% (CCOL n°3 ; Paris, 1979) à 10% (CCOL n°4 ; Bilthoven, 1980), puis à 5-10% (CCOL n°5 ; Copenhague, 1981) et à 3-5% (CCOL n°6 ; Genève, 1983). [Andersen & Sarma, 2002, pp. 51-66]

de la coopération entre membres de la CEE, et entre membres de la CEE et des autres pays européens ; *etc*… En définitive, les années 1979-85 sont impropres à des réglementations ambitieuses sur les CFC.[424] [Conway, 2008 ; Litfin, 1994]

A partir du tournant des années 1970, à la faveur de la révision de certaines variables utilisées dans les modèles (mais, sans que la nature des variables n'évolue), certaines prévisions de destruction d'ozone repartent à la hausse (voir Figure 35 ci-dessous)…[425]

[424] Au cours des huit années précédant la signature du Protocole international de Montréal (1987), on voit simplement la Norvège imiter son voisin suédois en 1979, en interdisant les produits aérosols (la Suède a voté la suppression des CFC dans la plupart des bombes aérosols dès 1977). Suède et Norvège seront rejoints en 1984 par le Danemark. La CEE prend également des initiatives au début des années 1980 : en mars 1980, le Conseil européen demande à ses membres de limiter la capacité manufacturière de production de CFC et de réduire de 30% les produits aérosols avant la fin de l'année 1981. En septembre 1980, le Japon annonce des plans pour réduire la consommation de CFC et limiter leur production. Toutefois, avant la signature du Protocole de Montréal, les membres de la CEE et le Japon n'initieront aucun programme de développement de substituts ambitieux. [Andersen & Sarma, 2002, pp. 377-380]

[425] En ce qui concerne les rapports du CCOL, il faudra attendre quelques années avant que ses conclusions ne réalisent des prédictions de destruction globale d'ozone à la hausse. Lors de la huitième séance du CCOL à Nairobi (février 1986), le rapport des USA défend que les libérations de CFC-11 et CFC-12 aux taux de 1980 induiraient une diminution de la colonne d'ozone de l'ordre de 4,9 à 7%. Publié l'année précédente, le grand rapport en 3 volumes *NASA*/…, 1985 avait pour sa part tablé sur une diminution de 5 à 9% – contre 3-5% à la CCOL n°6 de 1983 (toutes ces prédictions étant faites avec les mêmes taux fixes de CFC-11 et CFC-12 de l'année 1980, projetées dans le futur). [Andersen & Sarma, 2002, pp. 51-66]

Comme en témoigne la Figure 35, dans les années 1971-85, la science de l'ozone se trouvait dans une phase de grande instabilité. Les experts du grand rapport sur l'ozone de 1985 consacreront de nombreuses pages aux « incertitudes ». En outre, pour justifier les fluctuations des simulations de la Figure 35, ils invoqueront notamment la révision des constantes de réaction des composés hydrogénés HO_x. « Les variations de prédictions de la figure ne sont pas dues à des changements de coefficients de réaction dans les systèmes des Cl_x ou des NO_x, écrivent-ils, mais plutôt, en grande partie, à des révisions des coefficients de réaction du système HO_x. » [*NASA*/…, 1985, p. 772]

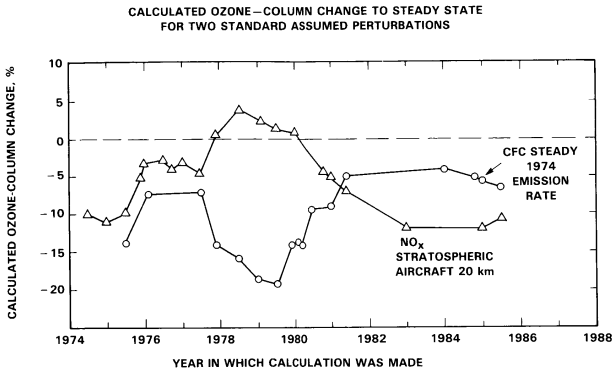


Figure 35 : Evolution des projections de l'altération anthropique de la colonne d'ozone (à l'état stationnaire), d'après les modélisateurs du 'Lawrence Livermore National Laboratory', pour deux « perturbations » jugées possibles : une hypothèse de large flotte d'avions supersoniques (correspondant à une présence de 2000 molécules.cm^{-3}.s^{-1} de NO_X sur un intervalle d'un kilomètre autour de 20 km d'altitude) ; des émissions continues de CFC-11 et CFC-12 aux taux de 1974)
[*NASA*/…, 1985, "Figure 13-37", p. 773]

Autre tendance. Lors de la sixième séance du CCOL à Genève en 1983, il est annoncé que les émissions de CFC sont reparties à la hausse au cours de l'année 1980-81. A partir du début des années 1980, la consommation de CFC est en effet repartie à la hausse (voir Figure 37 du Chapitre 8).

De plus, malgré leur baisse, les prévisions de destruction d'ozone sont restées significatives y compris à la fin des années 1970 (avec un pic de destruction de « ~40% ou plus » prévu à 40 km « par tous les modèles » retenus pour le rapport de 1985, en cas d'émissions de CFC-11 et -12 aux taux de 1980 [*NASA/…*, 1985, p. 18]). Aux yeux de la plupart des scientifiques nord-américains lancés dans l'expertise de la destruction anthropique de l'ozone, les premières réglementations états-uniennes de 1978 ne constituent qu'une première étape réglementaire, inapte à garantir la préservation de la couche d'ozone sur le moyen terme. Au tournant des années 1980, la ligne de conduite de la NAS demeure semblable à celle des années précédentes. Le rapport du 'National Research Council' de la NAS de 1979 ('Committee on Impacts of Stratospheric Change' & 'Committee on Alternatives for the Reduction of Chlorofluorocarbon Emissions') réitère les conclusions alarmistes des rapports précédents :

> « Si la libération mondiale de divers types de [CFC] se perpétuait aux niveaux de celle de l'année 1977, la valeur la plus probable de la destruction finale d'ozone serait de 16%. [...] Aux Etats-Unis, une destruction d'ozone de 16% occasionnerait au final plusieurs milliers de cas de mélanomes surnuméraires chaque année. [... Et, dans l'éventualité d'une réduction d'ozone entre 16 à 30%,] les productions agricoles de plusieurs types pourraient être réduites [...,] les formes larvaires de plusieurs espèces importantes de fruits de mer, ainsi que de micro-organismes à la base de la chaîne alimentaire marine seraient tués en quantité non

> négligeable [...]. Quant aux impacts climatiques d'une libération continue de CFC aux niveaux de ceux de 1977, ils incluraient un réchauffement moyen de la surface de la Terre de quelques dixièmes de degré Celsius avant le milieu du vingt-et-unième siècle. » [*NAS*, 1979 **in** Andersen & Sarma, 2002, pp. 12-13]

Plus généralement, *en ce qui concerne la communauté scientifique*, il serait abusif de parler de démobilisation, et d'une lénification des discours au sujet des dangers que représentent les ODS. Lors des réunions du CCOL, les scientifiques de l'ozone continuent à présenter leurs prévisions de destruction d'ozone comme alarmantes, même si elles sont à la baisse.

La nécessité de renouveler le modèle d'expertise

Il fallait rappeler ces points au sujet de la nature très fluctuante des conclusions scientifiques à la fin de décennie 1970 et au début des années 1980. Cette instabilité des savoirs, qui existe depuis la publication de M. Molina et S. Rowland en 1974, constitue l'une des raisons qui pousse R. Watson et ses collègues scientifiques à repenser en profondeur le modèle d'expertise de l'ozone. Mais, comme nous le montrons dans la suite de ce sous-chapitre, elle n'est nullement le seul mobile. Le nouveau type d'expertise qui émerge alors est en effet indissociable des motifs politiques, et en particulier de la diplomatie internationale de l'ozone qui se met alors en place.

Au lendemain de la violente controverse sur les CFC aux Etats-Unis, les *appels en faveur de la création d'un nouveau type d'expertise* se font pressants. A l'avenir, entend-on, l'expertise de l'ozone devra être soutenue par *de plus nombreuses mesures de laboratoire* et, surtout, par *de plus nombreuses mesures 'in situ'*. Elle devra être faite *par des scientifiques d'élite*, des *spécialistes*, qui auront toute légitimité à parler au nom de la couche d'ozone. Elle devra *intégrer la recherche privée*. Elle devra *jeter de nouvelles passerelles plus solides entre les scientifiques, les décideurs politiques et l'industrie* (par le biais de rencontres ritualisées, mais aussi d'outils : modélisations numériques sur la base de scénarios, indices environnementaux). Enfin, elle devra *être plus internationale*. En d'autres termes, si l'on escompte générer de nouvelles réglementations d'ODS, il faudra pallier les limites du régime de l'ozone des Etats-Unis dans les années 1970, en dégageant un consensus international, ou tout le moins « en réduisant la possibilité d'interprétations entrant en compétition », pour le formuler comme E. Conway et N. Oreskes, à partir d'un entretien réalisé par E. Conway avec Robert Watson [Oreskes & Conway, 2010, p. 118 ; d'après un entretien avec R. Watson daté du 14 avril 2004].

R. Watson, nous l'avons dit, sera l'une des figures centrales de l'expertise qui s'organisera à l'échelle internationale à partir de 1977 ; il présidera le comité de rédaction du premier grand rapport international sur l'ozone : *Atmospheric Ozone. 1985. Assessment of our*

Understanding of the Processes Controlling its Present Distribution and Change [*NASA/…*, 1985]. Les institutions les plus impliquées dans la pratique et la coordination des mesures internationales d'ozone seront la NASA, à laquelle appartient Watson, et la NOAA. La construction d'une expertise internationale commune se fera notamment au cours des réunions du 'Coordinating Committee on the Ozone Layer' de l'UNEP (CCOL ; 1977-86).

De nombreux auteurs se sont ingéniés à décrire le nouveau type d'expertise qui est né au sujet de la destruction de l'ozone entre la fin des années 1970 et la publication du grand rapport de 1985 (par exemple, Haas, 1992 (2) ; Parson, 2003 ; Litfin, 1994 ; Conway, 2008 ; Lambright, 2005). Dans les trois sections suivantes, nous nous décrivons deux caractéristiques importantes de cette nouvelle pratique d'expertise :

- le dialogue science-industrie et science-décideurs politiques qu'elle opère, par le biais, d'une part, d'un travail sur les modèles numériques de chimie-transport 2-D et 3-D, dont des modèles intégrés (avec scénarios d'émissions), et, par le biais, d'autre part, d'une élaboration d'indices environnementaux (ODP, charge en chlore, GWP) ;
- le caractère international de l'expertise, visant à générer un document unique qui fasse autorité, à multiplier les mesures d'ozone hors-Etats-Unis, et à mobiliser des scientifiques de nationalités multiples qui ne possèdent pas nécessairement de tradition scientifique sur l'ozone.

Les simulations numériques : coopérer avec l'industrie, dialoguer avec les décideurs

La nouvelle expertise de l'ozone se donne entre autres tâches la *modération des tensions entre recherche publique et recherche privée*. A la fin des années 1970, ni l'une, ni l'autre ne peuvent rester dans une simple opposition manichéenne. Du côté de la science publique et du CIAP, le déficit le plus fâcheux tient dans l'absence de séries de mesures systématiques de terrain aptes à dégager des tendances d'ozone sur le moyen terme. L'expertise publique, à présent dominée par la NASA et la NOAA, doit en outre faire accéder les modèles de chimie-transport aux deuxième et troisième dimensions (latitudinale et longitudinale, respectivement), et consolider les connaissances de laboratoire sur les constantes de réactions chimiques.

Du côté des industriels, qui peuvent difficilement prétendre envisager de déployer des instruments de mesure à l'échelle planétaire, on continue à travailler en laboratoire sur les constantes de réactions chimiques. Et surtout, on développe des modèles numériques. Des échanges nourris se créent alors entre les scientifiques de la recherche publique et les quelques chercheurs du privé (de DuPont, notamment) : d'une part, autour des projections

dans le futur à l'aide de l'outil de modélisation ; et d'autre part, autour des calculs de l'indice ODP ('Ozone Depletion Potential'), qui impliquent des travaux de laboratoires sur les constantes de réactions.

Nous reviendrons sur l'ODP dans la Section suivante. Pour l'heure, attardons-nous sur les pratiques de modélisation numérique. A partir de la fin des années 1970, les chercheurs de DuPont de Nemours développent leur propre modèle de chimie-transport. Rapidement, les modélisateurs de DuPont sont intégrés au processus de travail d'expertise OMM/UNEP. On les retrouve dans les CCOL. Et, 'in fine', dans le rapport de 1985, où les simulations d'A.J. Owens de DuPont côtoient celles du LLNL (D. Wuebbles), de Harvard (M. Prather), de l'Institut belge d'aéronomie (G. Brasseur) et du 'Max Planck Institut für Chemie' (C. Bruehl et P. Cruzten), ainsi que celles d'une autre institution privée : l''Atmospheric and Environmental Research, Inc.' (D. Sze), un organisme d'expertise et de conseil en environnement créé en 1977 [*NASA/…*, 1985, p. 726].

La participation de DuPont à l'élaboration de modélisations numériques a sans nul doute facilité la *confiance* des industriels dans les modélisations des scientifiques de la recherche publique. En effet, on a assisté à une "convergence" des résultats des simulations de DuPont et de celles de la recherche publique au début des années 1980. Le rapport de 1985 en témoigne [*NASA/…*, 1985, "Chapter 13"].[426] Certes, mais ceci ne suffit pas à faire de DuPont un avocat des réglementations. Au début de l'année 1986, DuPont s'oppose encore à l'idée de nouvelles réglementations.

Par contre, en septembre 1986, voyant la perspective de signature d'un accord international s'approcher, et jugeant importante sa capacité à mettre rapidement sur le marché des substituts aux CFC, DuPont fait le choix stratégique de se positionner dans le sillage des défenseurs d'un protocole international sur les CFC. La déclaration publiée par DuPont brisa la position réfractaire de l'industrie, et fut un élément déclencheur des textes législatifs sur les ODS des années à venir. Nous y reviendrons. Ce qui nous intéresse pour l'instant, ce sont les « nouvelles découvertes » que DuPont invoque pour légitimer sa volte-face. Elles ne sont autres que les modélisations numériques – l'outil-même qui avait cristallisé les plus virulentes critiques de DuPont à l'égard des expertises de la NAS, du DoT et de l'EPA dans les années 1974-77 ! Le "DuPont Position Statement on the

[426] Ajoutons que, depuis cette époque, un chercheur de DuPont nommé Mack McFarland a participé durablement au processus d'expertise international. On le retrouve dans les COP, et comme expert privé parmi les experts de la recherche publique dans les réunions de finalisation des 'Scientific Assessments of Ozone Depletion' aux Diablerets (Suisse). (Dans le rapport de 1985, McFarland est cité comme auteur uniquement. Le seul contributeur de DuPont à la rédaction du rapport est A.J. Owens [*WMO/…*, 1985, p. 1040].)

Chlorofluorocarbon-Ozone-Greenhouse Issues", publié à l'hiver 1986 dans *Environmental Conservation*, énonce :

> « Tous les modèles prédisent à présent que des hauts niveaux d'augmentation continue de CFC [(correspondant à une multiplication des émissions par 3 à 5)] engendreraient une destruction significative d'ozone. » [DuPont, 1986, **in** Haas, 1992 (2), p. 205]

Non seulement les coopérations avec la recherche publique et la fréquentation des "forums hybrides" CCOL ont permis à DuPont d'anticiper le moment où de nouvelles réglementations devenaient presque inévitables (R. Grundmann précise que la couverture médiatique du trou de la couche d'ozone en 1985-86 a été beaucoup plus importante aux Etats-Unis qu'en Europe [Grundmann, 2002 & 2006]) ; mais, en 1986, les modélisations de DuPont, reconnues par la communauté scientifique publique, donnent à l'industriel l'argument rationnel pour accepter, à présent, de nouvelles réglementations de CFC.

Au début des années 1980, les experts de l'ozone introduisent en outre de premiers modèles dits « intégrés », qui calculent les évolutions futures de l'ozone sur la base de différents scénarios d'émissions.[427] Il s'agit de s'adresser à un public cible, les industriels et les décideurs politiques, pour lesquels d'éventuelles réglementations d'ODS industriels ne peuvent se faire de manière brutale, mais nécessairement de manière échelonnée, sur une ou plusieurs décennies, par le développement de substituts industriels.

Dans le « Chapitre 2 » sur « les débuts de la diplomatie de l'ozone (1974-87) » de leur ouvrage *Protecting the Ozone Layer – the United Nations History*, Stephen Andersen et Madhava Sarma ont signalé que la notion de scénario a été introduite par des experts de l'OCDE dès la première rencontre de l''Ad hoc Working Group of Legal and technical Experts for the Elaboration of a Global Framework for the Protection of the Ozone Layer', organisée par l'UNEP en janvier 1982 [Andersen & Sarma, 2002, p. 53]. On la retrouve, ensuite, dans le grand rapport de 1985. Parmi les conclusions du Chapitre 13 "Model predictions", on peut ainsi lire :

> « Le Chapitre [13] présente une série de simulations numériques détaillant les meilleures estimations actuelles de la réponse de la composition atmosphérique à une gamme de perturbations potentielles. Le choix de scénarios prenant en compte des changements de concentrations en CFC, N_2O, CH_4 et CO_2 reflète les découvertes qui montrent que leurs concentrations augmentent en ce moment, et que ces perturbations sont fortement couplées. » [NASA/..., 1985, p. 18]

Les experts de l'ozone précisent :

[427] Ils sont donc à peu près concomitants des premières simulations de l'IIASA à l'aide du modèle intégré des pluies acides RAINS (dont la version primitive date de 1984 – voir Sous-chapitre 3.2).

> « (7) Des scénarios d'évolution [de l'ozone] ont été réalisés à l'aide de modèles unidimensionnels, avec des taux d'augmentation annuelle de CO_2, CH_4 et N_2O de 0,5%, 1% et 0,25%, en temps que des taux d'augmentation de CFC de 0%, 1,5% et 3% par an. Les effets de la colonne d'ozone sont relativement faibles (<3% au cours des 70 prochaines années) pour des augmentations de CFC ≤1,5% par an ; avec un taux d'augmentation de CFC de 3% par an, les prédictions de destruction d'ozone sont de 10% après 70 ans et continuent à augmenter rapidement. » [NASA/..., 1985, p. 19]

Les modélisations dites « évaluations intégrées » qui produisent ces scénarios sont l'œuvre d'économistes. « Les projections économiques, précisent les auteurs du rapport de 1985, doivent incorporer des prévisions de population et de changement de PNB, le développement régional et les changements de technologies. » Ils ajoutent qu'il n'est pas possible d'effectuer des prévisions fiables sur le long terme, à un horizon de cent ans. Aussi, dans leur "Chapter 1. Introduction and science summary", les auteurs du rapport présentent-ils des conclusions à un horizon de 70 ans avec un scénario simplifié à l'extrême de +3% de CFC par an (voir citation ci-dessous). Par contre, ils utilisent des scénarios d'économistes pour des « prévisions pour les CFC-11 et -12 jusqu'à 1995 ». [*NASA/…*, 1985, pp. 76-77]

Là encore, un travail de coproduction avait été mené entre des experts publics (certains travaillant ou ayant travaillé pour l'OCDE) et l'industrie. Les prévisions pour l'Europe de l'ouest, l'Australie, la Nouvelle-Zélande et l'Afrique du sud, notamment, écrivent les auteurs du rapport, ont « été préparées par le CEFIC ('European Fluorocarbon Technical Committee' (EFCTC), 'A CEFIC Sector Growth Halocarbon Trend Study', 1983-1995). CEFIC est l'acronyme de « Conseil Européen des Fédérations de l'Industrie Chimique » (aujourd'hui, Conseil Européen de l'Industrie Chimique). Le CEFIC est la principale association professionnelle de l'industrie chimique européenne (fondée en 1957, l'année de la signature du Traité de Rome). Les autres institutions pourvoyeuses de scénarios qui sont citées sont l'OCDE, la RAND et l'institut de recherche états-unien 'SRI (Stanford Research Institute) International'. Le Comité pour l'environnement de l'OCDE avait été l'un des premiers à élaborer des scénarios d'émissions d'évolution des CFC, au cours de l'année 1980. [*NASA/…*, 1985, pp. 76-77 ; Parson, p. 111]

Les indices environnementaux, outils de médiation entre décideurs politiques et secteurs industriels, et entre diplomates

L''Ozone Depletion Potential' (ODP)

Parallèlement aux modèles intégrés, un autre "objet frontière" est introduit au début des années 1980 : l'indice environnemental 'Ozone Depletion Potential' (ODP). Dès 1981, l'US EPA demande à Donald Wuebbles de développer une métrique à l'aide de ses modèles [entretien de l'auteur avec D. Wuebbles aux Diablerets (Suisse), le 30 juin 2010]. Elle doit établir, pour chaque composé industriel potentiellement destructeur d'ozone, un lien quantifié entre les émissions et les concentrations d'ozone stratosphérique.

D. Wuebbles est un scientifique de l'atmosphère, et avant tout un modélisateur. Il a rejoint en 1973 le 'Lawrence Livermore National Laboratory' (LLNL ; Université de Californie), qui possède des ordinateurs parmi les plus puissants dans le monde, et peut se vanter de posséder une longue tradition de modélisation de l'atmosphère (qu'ont notamment alimentée Edward Teller et Michael MacCracken au sujet de la pollution radioactive et des effets des essais nucléaires atmosphériques sur le climat [Dörries, 2011, pp. 204-205]). Wuebbles réalise principalement des modélisations globales du changement climatique et de la destruction anthropique de l'ozone stratosphérique, souvent en collaboration avec son collègue du LLNL, J.S. Chang. Si l'EPA fait appel à Wuebbles, ce n'est pas pas sans raison. En 1981, le chercheur a déjà signé plusieurs articles où il a exposé des résultats de simulations numériques de destruction de la couche d'ozone, faites sur la base de plusieurs scénarios d'émissions différenciées : CFC par CFC, halon par halon, plusieurs CFC ensemble, *etc.* [Wuebbles, 2009, pp. 7-8]

En 1981, Wuebbles accède immédiatement à la demande de l'EPA. Il rédige un rapport interne pour le LLNL, intitulé "The relative efficiency of a number of halocarbons for destroying stratospheric ozone", dans lequel il introduit une notion de « potentiel relatif de destruction d'ozone des gaz ». Celle-ci est une estimation quantifiée du potentiel relatif de destruction d'ozone des halocarbones par rapport à un gaz référent, l'un des deux CFC les plus libérés dans l'atmosphère (avec le CFC-12) : le CFC-11. Dans la même logique, Wuebbles publie en 1983 deux articles dans *Journal of Geophysical Research*, sous les titres "Chlorocarbon Emission Scenarios: potential impact on stratospheric ozone" et "Effects of coupled Anthropogenic perturbations on Stratospheric Ozone". [Wuebbles, 1981; *WMO/…*, 1989, pp. 303-304 ; Wuebbles, 1983 ; Wuebbles *et al.*, 1983] D. Wuebbles présente en outre son concept d'ODP dans le cadre des rencontres internationales de l'ozone.

Le concept d'ODP apparaît seulement en filigrane dans le grand rapport de 1985, par le biais des références faites aux modélisations de Wuebbles, qui réalise des simulations d'évolution de l'ozone selon plusieurs scénarios économiques et avec plusieurs composés auxquels il associe un pouvoir de destruction d'ozone (un ODP, donc) [*NASA/…*, 1985]. Mais, un programme de travail se crée autour de cette notion. Stimulé par l'EPA, il fait coopérer des scientifiques de l'atmosphère et des industriels.

Cette collaboration se fait autour de la rédaction d'un rapport de plusieurs centaines de pages, auquel contribue Donald Wuebbles. Rédigé en 1988-89, ce long texte va finalement prendre la forme d'un second volume du rapport du premier groupe de travail (dit « scientifique ») du premier rapport WMO/UNEP/… sur l'ozone ('Scientific Assessment of Stratospheric Ozone') [*WMO/…*, 1989, "Volume II"]. Il sera intitulé "Volume II. Appendix: AFEAS Report". Que désigne l'acronyme AFEAS ? Le consortium 'Alternative Fluorocarbon Environmental Acceptability Study'. Le consortium est « conduit par des scientifiques indépendants », déclarent les auteurs du rapport AFEAS – comprendre, par des scientifiques "spécialistes de l'ozone" (de la recherche publique mais aussi de chez DuPont) –, et « a été financé par 15 industries productrices d'ODP » [*WMO/…*, 1989, pp. 3-7, "Annex A. Experts and Reviewers involved in AFEAS", pp. "A.1 & A.2", "Annex B. Companies Sponsoring AFEAS", p. B.1].

Le rapport EFEAS se présente comme une étude sur les dangers environnementaux des substituts aux CFC. Comme avec les modèles numériques, le premier objectif de ce programme de travail entre scientifiques de l'atmosphère et industriels est de *générer une plus grande confiance des industriels dans la théorie de la destruction anthropique de l'ozone*. Un second but est de *faire travailler les industriels au développement de substituts* autour de cette notion de « pouvoir de destruction » de ses produits. L'ODP, qui impute à chaque substance industrielle un potentiel de nocivité est un outil idoine pour dialoguer avec les industriels, "matériellement", dans un langage d'ingénieur. De plus, il "personnifie" les risques. Chaque industriel est ainsi responsabilisé. S'il n'est pas en mesure de réfuter les valeurs d'ODP des experts à l'aide de ses propres mesures de laboratoire, alors il doit (idéalement) développer des substituts. L'existence des ODP limite la portée rhétorique de certaines critiques traditionnelles des industriels, qui reprochent à leur Etat de leur imposer des réglementations iniques par rapport à un concurrent développant un produit semblable, ou par rapport à un autre secteur d'activité.

Le troisième objectif est d'impliquer les industriels hors-Amérique du nord et hors-Scandinavie, qui accusent un retard en matière de développement de substituts des CFC. Parmi les « 15 industries productrices d'ODP » des CFC qui financent l'AFEAS, on trouve ainsi deux entreprises britanniques ('ICI Chemical and Polymers' et ISC Chemicals'), deux

japonaises ('Asahi Glass' et 'Daikin Industries'), deux ouest-allemandes (Hoechst AG et Kali-Chemie AG), une française ('Atochem'), une grecque ('Chemical Industries of Northern Greece'), une italienne ('Montefluos SpA)). [*WMO/…*, 1989 (2), "Annex B. Companies Sponsoring AFEAS", p. B.1].

Le rapport de 1989 est produit au lendemain de la signature du Protocole de Montréal (1987). Or, si tous les grands pays producteurs et consommateurs d'ODS l'ont signé, il ne réglemente qu'une partie de ces composés. Le travail diplomatique continue, en vue d'amender le Protocole pour le rendre plus contraignant. Les négociations autour l'ODP, qui avaient dans un premier temps principalement pris la forme d'échanges entre pouvoirs publics et industries nationales (d'abord, entre 'US EPA' et industries états-uniennes, puis par le biais de l'AFEAS), jouent à présent un rôle manifeste d'*outil de négociation internationale entre pays, secteur industriel par secteur industriel* (bombes aérosols, solvants, réfrigérants, électronique, *etc.*).

Le fardeau environnemental que représente chaque pays, et chacun de ses secteurs industriels, peut désormais être estimé à l'aide de l'ODP (voir Figure 36 ci-dessous). Les termes « fardeau » ou « poids » sont désormais employés dans les négociations, ainsi que l'expression « 'ODP-weighted bundle' (« paquet d'émissions établi à l'aide de l'ODP) »). Ainsi, Edward Parson écrit que les négociations du Protocole de Montréal (1987) se conclurent sur l'accord suivant : « cinq CFC et deux halons seraient réglementés, dans deux paquets séparés, établis d'après les valeurs des ODP des gaz ('in two separate ODP-weighted bundles) ». [Parson, 2003, pp. 174 & 137]

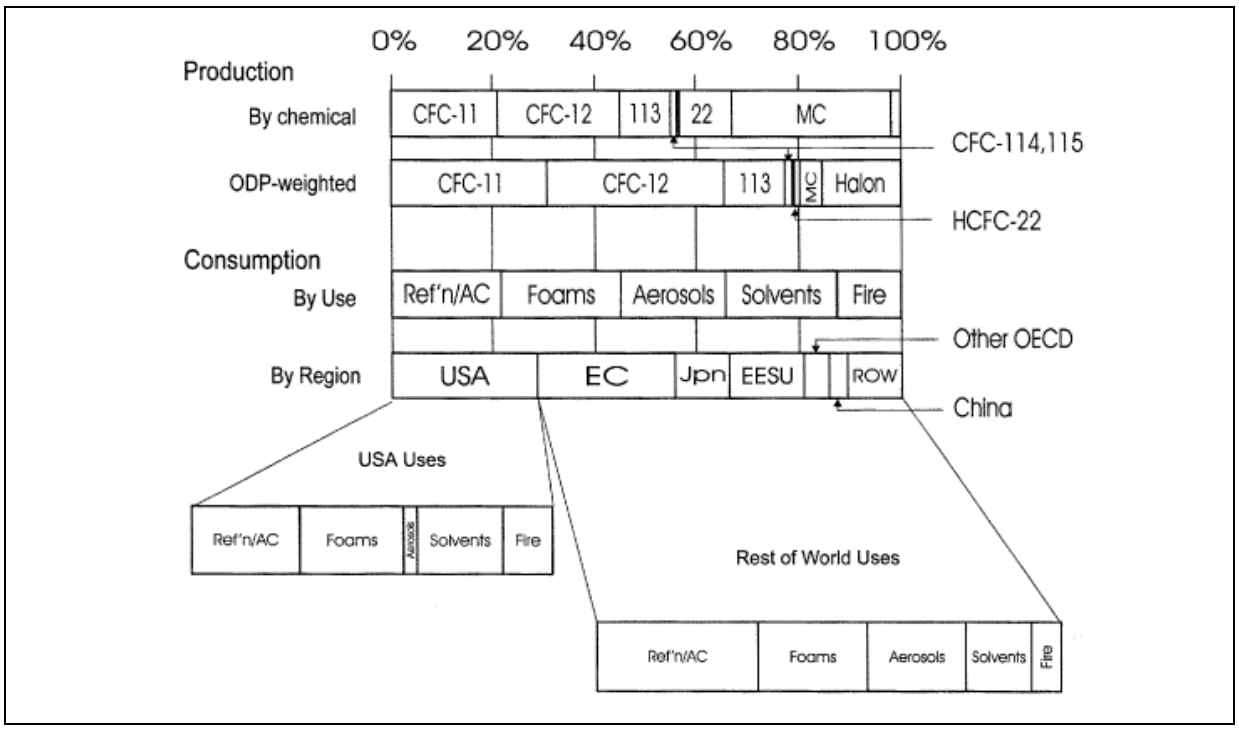


Figure 36 : Production et consommation des produits chimiques destructeurs d'ozone en 1986, dont la part de nocivité lié à la production des CFC-11, CFC-12, CFC-113, CFC-114 & -115, HCFC-22, méthylchloroforme (MC) et halons calculée d'après les valeurs de leurs ODP
[Parson, 2003, "Figure 7.1", p. 174, "Author's calculations, based on Data from AFEAS 1995, Midgley 1989, EPA 1988, UNEP 1999 & UNEP 2002]

Précisons que, en fait, plutôt que le terme « paquet ('bundle') d'ODS », c'est le terme « panier ('basket') d'ODS » qui allait s'imposer dans les arènes scientifiques et de négociations (voir notre Sous-chapitre 9.1).

De l'ODP au 'Global Warming Potential' (GWP)

Dès le milieu des années 1970, des scientifiques dont Veerabhadran Ramanathan (à la NASA (1973-75), puis au NCAR) ont documenté l'effet de serre très puissant des CFC. En outre, avec la mise à l'agenda politique international du changement climatique (que l'on peut, avec Bodansky, faire débuter avec la Conférence de Villach de 1985 [Bodansky, 2001, p. 25]), les scientifiques de l'atmosphère ont cherché des chemins de réduction d'émissions de GES. Comme nous l'avons répété à maintes reprises, les scientifiques qui publient sur l'ozone stratosphérique publient aussi le plus souvent sur le changement climatique, et ceci dès les décennies 1970-80. C'est par exemple le cas de D. Wuebbles, qui publie en 1985-86 plusieurs travaux sur l'impact des gaz traces sur le climat global [Owens *et al.*, 1985 ; Wang *at al.*, 1986].

Au milieu des années 1980, des scientifiques décident d'élaborer un 'Global Warming Potential' (GWP) sur le modèle de l'ODP. Il s'agit alors d'un « GWP spécifique aux halocarbones » – un « 'Halocarbon Global Warming Potential' ». En effet, le

gaz référent, dont l''Halocarbon Global Warming Potential' est égal à un, est le CFC-11 – de la même manière que l'ODP du CFC-11 est égal à 1 [*WMO/…*, 1989 (1), "Chapter 4. Halocarbon Ozone Depletion and Global Warming Potentials", pp. 401-465].

En 1988, est créé le GIEC. Pour ses experts, le gaz de référence ne doit plus être le CFC-11, mais le CO_2. Des collègues atmosphériciens-climatologues demandent alors à Donald Wuebbles (et à un autre atmosphéricien) de développer un GWP pour le GIEC, qui serait « un pouvoir de réchauffement climatique » relatif au pouvoir de réchauffement du CO_2 (avec GWP (CO_2) = 1, donc) [entretien de l'auteur avec Donald Wuebbles aux Diablerets (Suisse), le 30 juin 2010 ; *IPCC (WGI)/…*, 1990, pp. 58-61].

Nous reviendrons sur les implications politiques du pouvoir climatique des ODS dans le Sous-chapitre 8.2.

ODP et « charge en chlore »

L'ODP n'est pas la seule métrique utilisée dans les rapports internationaux sur l'ozone pour faire le lien entre l'arène scientifique et l'arène réglementaire. La « charge en chlore ('chlorine-loading') » et « le potentiel de charge en chlore ('chlorine loading potential' (CLP) » de la stratosphère ont été introduits dans les débats sur l'ozone peu après l'ODP.

Dans le grand rapport de 1985, les experts parlent seulement de « chlore total ('total chlorine') » dans l'atmosphère [*NASA/…*, 1985, pp. 646-647]. Par contre, les deux indices ODP et « charge en chlore » cohabitent dans tous les 'Scientific Assessments of Ozone Depletion' (1989-…). Cette notion de « charge » de polluants affectant l'environnement n'est évidemment pas nouvelle. Dans cette thèse, nous avons déjà rencontré des « charges critiques » associées aux pluies acides.

Nous ne pouvons entrer ici dans les débats des experts sur les vertus et les imperfections relatives des ODP et de la charge en chlore. Signalons simplement que, dans le contexte post-1985 où les deux indices cohabitent, c'est-à-dire suite à la "découverte" du trou de la couche d'ozone antarctique, dont résulte une remise en question profonde de la science théorique de l'ozone (voir Sous-chapitre 7.2), plusieurs controverses auront lieu au sujet des conséquences politiques de l'utilisation, soit de l'ODP, soit de la charge en chlore stratosphérique. Les auteurs du premier 'Assessment of Ozone Depletion écrivent ainsi :

> "Because of the apparent special chlorine processing and dynamics within the polar winter vortex [where the ozone hole is generated], local Antarctic ODPs are expected to be larger than those shown in Table 3. Insofar as the observed long-lived tracer distributions, such as CFC-11 in the polar vortex, suggest that much of the total chlorine may be available there, then an upper limit on Antarctic ODPs can be determined by calculating the relative amounts of chlorine transported through the tropopause by the different gases. These

> chlorine loading potentials (CLPs) determined using assumed reference lifetimes (which generally agree with those in the models used here) can be as large as a factor of two to three times the derived ODP values (c.f., Tables 3 and 5). The ramifications of polar ozone depletion for global ozone depletion potentials (ODPs) are not currently clear." [*WMO/...*, 1989, p. xxx]

Par la suite, les deux indices seront mis en avant successivement dans les 'Assessments of Ozone Depletion', afin de souligner des impacts particuliers possibles d'ODS particuliers, dans des échelles de temps particulières. Nous ne pouvons ici rendre compte de ces débats complexes, qui sont rouverts à chaque nouvelle rédaction d'un 'Assessment of Ozone Depletion' [*WMO/…*, 1989, 1992, 1995, 1999, 2003, 2007 & 2011].

Soulignons simplement ici que, *à la fin des années 1980*, c'est *en grande partie par défaut* que la charge en chlore fut privilégiée aux dépens de l'ODP dans les négociations. Comme l'a montré Karen Litfin, en 1989, les scientifiques de l'ozone jugeaient qu'ils avaient établi le lien entre trou de la couche d'ozone et CFC sur la base de leurs mesures de terrain. Mais, la *théorie* du trou de la couche restait quant à elle seulement embryonnaire. Dans une telle situation où les modèles étaient impuissants à rendre compte du phénomène, écrit K. Litfin, l'utilisation de la charge en chlore de l'atmosphère comme indice était « la stratégie discursive » la plus crédible pour formuler des propositions de nouvelles réglementations, dans la mesure où un calcul fiable d'ODP nécessitait une théorie physico-chimique qui n'existait pas encore. [Litfin, 1994, "chapter 5", pp. 10-12 of 42]

Lorsque Margaret Thatcher voulut renforcer le Protocole de Montréal, poursuit K. Litfin, elle mit en avant le chiffre de « 85 pourcent de réduction des CFC, qui correspondait à une stabilisation des concentrations de chlore atmosphérique aux niveaux existants. » Face à elle, l'industrie des CFC britannique, qui continuait à s'opposer à l'idée d'une suppression progressive totale des CFC, répondit par une attaque en règle contre l'approche des charges en chlore. Premièrement, soulignèrent les industriels, les prédictions d'évolution des concentrations de chlore variaient de manière inattendue en fonction des scénarios. Deuxièmement, l'approche de la charge en chlore ne disait rien sur la destruction de la couche d'ozone et l'augmentation des UV, qui sont les réels sujets d'inquiétude. Troisièmement, arguait l'industrie, « la charge en chlore était « un paramètre isolé ('a remote parameter'), correct seulement si toute la Terre fût semblable à l'Antarctique » (entretien de K. Litfin avec Mike Harris, 'Regulatory Affairs Manager', 'Imperial Chemical Industries' (Royaume-Uni, le 12 septembre 1991)) ». [Litfin, 1994, "chapter 5", pp. 10-12 of 42]

Malgré ces objections, précise K. Litfin, pour la plupart des participants aux négociations de 1988-1992, les données d'observation mises sur la table depuis 1985 garantissaient la pertinence de « l'approche de la charge en chlore ». Ces négociations

débouchèrent sur la signature de l'Amendement du Protocole de Montréal à Copenhague (1992), qui demandait que la consommation de tous les CFC, les halons, le tétrachlorure de carbone et le méthylchloroforme chutent à zéro dans les pays développés d'ici à 1996. [Litfin, 1994, "chapter 5", pp. 10-12 of 42 ; voir Litfin, 1994, "chapters 4 & 5"]

Comme nous le verrons dans le Chapitre 9, un tel double cadrage en termes de potentiel d'impact environnemental et/ou de charge critique ('loading') sera reproduit dans les rapports du GIEC : un GWP ('Global Warming Potential') sera, comme nous l'avons dit, imaginé sur le modèle de l'ODP ; et, la charge en GES, et en particulier en CO_2 (*cf.* les fameux seuils de concentration en CO_2 exprimées en parties par million (ppm) : « 400 ppm », « 500 ppm », *etc.*) répondra à « la charge en chlore ».

La construction d'un collectif

Produire un document unique

Contrairement aux 'Scientific Assessments of Ozone Depletion' (1989-…), le grand rapport sur l'ozone de 1985 ne contient pas de section « 'executive summary' (résumé opérationnel) ») pour les décideurs politiques. Mais, ses auteurs mettent bien sûr en avant son utilité politique. Ils inscrivent même explicitement leur travail dans un récit en cours, celui de « la sauvegarde de la couche d'ozone », qui doit évoluer du stade des réglementations nationales aux réglementations internationales. En introduction du rapport, on peut lire :

> « De nombreux gouvernements à travers le monde ont reconnu que l'utilisation des chlorofluorocarbones constituait une menace potentielle pour la stabilité de la couche d'ozone, et ont pris une série de décisions pour réguler l'utilisation de ces substances. Cependant, aucune approche internationale coordonnée n'a jusqu'à présent vu le jour pour sauvegarder la couche d'ozone. » [*NASA*/..., 1985, p. 3]

Or, afin de susciter de nouvelles réglementations de CFC à l'échelle internationale, une partie importante des scientifiques qui se sont lancés dans l'aventure "environnementaliste" de l'ozone est convaincue qu'il faut *faire naître le plus rapidement possible un consensus scientifique international sur l'ozone, ou tout le moins produire des documents de référence présentant, au nom de la communauté internationale des scientifiques de l'ozone, des conclusions sur les risques encourus et leurs origines*.

Avant 1977, année de la première réunion du CCOL, et même jusqu'en 1980, des expertises scientifiques sur l'ozone avaient été publiées dans différents pays, mais de manière indépendante. Les rapports se retrouvaient « en compétition », écrit l'historien Erik Conway. « Le NRC [(Conway parle sans doute du CIAP en particulier, qui est confié à

la NAS, qui est l'une des composantes du NRC)] avait produit un rapport pour l'EPA, le United Kingdom's Meteorological Office en avait produit un pour le gouvernement britannique », l'Académie des Sciences française avait commandé le rapport COVOS, *etc.* Ajoutons à ces rapports nationaux ceux produits par l'OMM… En définitive, « chaque rapport faisait appel à différents groupes de spécialistes et arrivait à des conclusions différentes, produisant toujours plus de controverse et d'incertitude » [Conway, 2008, p. 148].

Une telle hétérogénéité des savoirs n'est pas *en droit* une gêne pour les scientifiques (la controverse est même brandie par les scientifiques comme un 'éthos' – *cf.* ce que Merton nomme le « scepticisme organisé »). Par contre, cet état devient importun dans le cas d'une expertise. « Avant 1980, affirme la philosophe et politiste Karen Litfin, […] les responsables politiques passaient plus de temps à rechercher les différences entre [les rapports] que leurs similitudes, alors qu'ils disaient plus ou moins la même chose. » D'où l'idée de rédiger au plus vite des textes communs : « avec un [unique] document, même s'il subsistait à l'intérieur une gamme d'avis différents, la communauté politique internationale avait une base commune » [Litfin, 1994, p. 82]. Les rencontres internationales organisées par l'UNEP (les CCOL) et la NASA, notamment, ont pour première vocation de générer *des rapports d'expertise internationaux uniques, qui pourraient ensuite servir de base à des négociations politiques transnationales plus apaisées*.

Une culture identitaire d'élite et internationale

Les rencontres scientifiques internationales sur l'ozone qui se déroulent de manière ritualisée à partir de 1976-77 ont une fonction sociale évidente. Les scientifiques de l'atmosphère de différents pays, invités sous financements de l'ONU ou même parfois de la NASA elle-même,[428] y partagent une expérience collective, dans le procès d'écriture collectif de rapports internationaux, mais aussi autour de travaux d'intercomparaison des mesures et de

[428] Comme nous l'avons expliqué dans le Chapitre 6, à la fin des années 1970, la NASA devient l'un des hauts lieux de la recherche mondiale sur l'ozone, grâce à un programme multi-instrumental qui dépasse largement le cadre strict des mesures depuis l'espace. La NASA et Robert Watson sont les acteurs référents dans la construction du grand rapport en trois volumes *Atmospheric Ozone* de 1985. Les cosignataires du grand rapport sont, *par ordre de désignation* : la NASA, l'US FEA ('Federal Aviation Administration'), la NOAA, l'UNEP, l'OMM, la Commission européenne et le 'Bundesministerium für Forschung und Technologie' (RFA). Quant à Robert Watson, il n'est autre que l'"overall chairman" du rapport [*WMO/…*, 1985, page de garde & p. 1033]. Sur le rôle central joué par la NASA et Robert Watson, voir Conway, 2008, Chapters 5 & 6.

Plus généralement, la majorité des contributeurs du rapport travaillent dans des laboratoires états-uniens. Sur les 139 collaborateurs des différents comités d'écriture des chapitres du rapport de 1985, plus de 80 sont basés aux Etats-Unis : 32 à la NASA ; 12 à la NOAA ; 12 au NCAR ; une vingtaine dans les Universités états-uniennes, l'EPA, des laboratoires de recherche militaire états-uniens, ou encore dans des organismes privés (MIT, 'Atmospheric and Environmental Research, Inc.', DuPont (A.J. Owens)), à raison d'un ou deux individus par institution [*WMO/…, 1985,* pp. 1033-1041]. Cette hégémonie des Etats-Uniens a perduré par la suite. Elle est beaucoup plus marquée dans les 'Scientific Assessments of Ozone Depletion' que dans leurs équivalents du changement climatique, les rapports du Premier groupe de travail du GIEC.

négociations sur les incertitudes, dans des échanges de savoir-faire instrumentaux, *etc.* Il s'agit, non seulement d'aboutir à une standardisation accrue des instruments de mesures, mais également de "standardiser", d'homogénéiser, de faire converger les savoirs sur l'ozone. Ce but est imparfaitement atteint. A la fin des années 1970 et au début des années 1980, les projections de destruction anthropique d'ozone à l'aide de modèles numériques donnent des résultats souvent difficilement conciliables. Il en va de même au sujet des mesures spectroscopiques d'ozone (au sol, depuis l'espace). Néanmoins, les 'Workshops' internationaux n'en possèdent pas moins une utilité incontestable : ils génèrent un sentiment d'appartenance à une communauté internationale et « écologique » (*cf.* Haas, 1992(2)), commun aux scientifiques de différentes institutions, de différents pays.

Robert Watson joue un rôle central dans la construction d'une culture identitaire forte au sein de la communauté de l'ozone. A partir de 1980, écrit l'historien de la NASA Henry Lambright, le chimiste britannique, installé au siège social de la NASA à Washington, développe « une certaine stratégie qui va devenir sa marque de fabrique, tant dans son activité de recherche que d'expertise : une "stratégie participative" » [Lambright, 2005]. Il s'agit, plus précisément, d'une *stratégie participative à l'échelle internationale*, que Karen Litfin décrit de manière plus détaillée. Elle écrit : Watson « attira des scientifiques aux 'Workshops' en faisant ressortir leur valeur professionnelle, déclarant que « les meilleurs scientifiques du monde s'y trouveraient », et que ces rencontres donneraient naissance à « un document dont [ils] pourraient tous être fiers » (propos rapportés par Ralph Cicerone à K. Litfin). » R. Watson mobilise donc au nom d'un sentiment d'apparence à une élite scientifique, et en mettant en avant le caractère méritoire du travail de rédaction d'un grand rapport sur l'ozone qui ferait référence. Parallèlement, l'aspect vertueux d'un travail contribuant à la protection de l'environnement est bien sûr mis en avant. [Litfin, 1994, Chapter 4, p. 4 of 30]

D'autres raisons « de viser une représentation large » sont avancées. Elles sont liées plus directement aux débats dans l'arène politique et à l'exercice du pouvoir politique. R. Watson et d'autres scientifiques qui œuvrent pour la publication d'un grand rapport international de référence « veulent briser le faux scepticisme qui n'est pas basé sur des faits, mais plutôt sur des déclarations du genre : « C'est de la recherche américaine » », rapporte K. Litfin. Watson fait en particulier des démarches pour coopter des compatriotes britanniques. Des scientifiques de certains pays sont invités aux 'Workshops' bien que l'on sache que leur contribution sera marginale (même si Watson confiera en 1997 qu'il « aurait dû faire un effort plus important pour inclure des scientifiques des pays en développement

et du bloc de l'Est (R. Watson, 1997, au cours d'un entretien accordé à *Science Impact*) »).[429] On espère qu'ils puissent mobiliser sur l'ozone dans leur pays. « Adoucir les préjugés nationalistes » et servir d'ambassadeurs : dans les deux cas, conclut K. Litfin, la logique des rencontres et des rapports d'expertise internationaux sur l'ozone de la première moitié des années 1980 est fondamentalement « politique », diplomatique. [Litfin, 1994, Chapter 4, p. 4 of 30]

Il s'agit donc, d'une part, de créer un sentiment d'appartenance à une élite, autour de la rédaction d'un grand rapport international soutenu par l'ONU. D'autre part, il s'agit d'élargir la communauté scientifique travaillant sur la destruction anthropique de l'ozone au-delà des Etats-Unis, du Canada et des pays scandinaves. En effet, à la fin des années 1970 et au début des années 1980, ces pays, où l'on a commencé à légiférer sur les CFC et qui souhaitent que les réglementations soient étendues, sont aussi les pays qui possèdent les communautés scientifiques les plus mobilisées sur la destruction de l'ozone. Nous l'avons montré pour les Etats-Unis dans la Partie B. Quant aux pays scandinaves, ils ont produit une génération de scientifiques de l'atmosphère globale, sous l'impulsion de C.-G. Rossby et B. Bolin, notamment. Nous l'avons dit, P. Crutzen a été formé à "l'Ecole de Stockholm" ; il est resté à l'Université de Stockholm jusqu'en 1974, année de son départ pour les Etats-Unis. Un autre acteur important dans les premières recherches sur l'ozone a été le Finlandais Ivar Isaksen, de l'Université d'Oslo.[430]

A l'inverse, au tournant des années 1980, les pays où les gouvernements traînent les pieds pour réglementer les CFC, en Europe de l'Ouest, au Japon et en URSS,[431] sont aussi des

---

[429] Cette "discrimination positive" a perduré. Voir sur ce point la note de bas de page n° 163 (Chapitre 3).

[430] Diplômé d'un doctorat à l'Université d'Oslo en 1973, I. Isaksen a toujours gardé un pied dans cette institution. Dès les années 1970, sa carrière a été ponctuée de séjours aux Etats-Unis. En 1975, aux Etats-Unis, il collabore avec P. Crutzen à l 'écriture de deux articles : Crutzen P.J., I.S.A. Isaksen & G.C. Reid, 1975, "Solar proton events: stratospheric sources of nitric oxide", *Science* ; Crutzen P.J., I.S.A. Isaksen & E.E. Ferguson, 1975: Measurements of stratospheric $CFCl_3$, CF_2Cl_2, and N_2O, *Geophys Res. Lett*. Jugés importants, leurs travaux seront récompensés en 1975 par un 'NOAA Award for outstanding scientific achievement' (partagé avec G. Reid et T. Holzer).

[431] Prenons l'exemple de la Communauté économique européenne. La CEE est signataire du 'World Plan of Action' (1977). En août 1977, sa Commission « recommande » un plafonnement des productions européennes de CFC-11 et CFC-12. Mais, il faut attendre mars 1980 pour que le Conseil européen exige de ses membres qu'ils réduisent leur production de produits aérosols contenant des CFC. Et, cette limitation est faible (même si elle doit être suivie d'effet rapidement : l'objectif de réduction de la production industrielle, de 30%, doit être atteint avant la fin de l'année 1981). [Andersen & Sarma, 2002, pp. 45 & 376-377]

Dans les années qui suivent, un net clivage existe toujours entre Nord-américains et Nord-européens, d'une part, et, d'autre part, la plupart des autres pays développés. L'opposition est patente dans le cadre des préparatifs de la Convention de Vienne (signée en 1985). Lors d'une réunion internationale organisée par les Nations Unies à Genève en 1984, « en sus [d'une] deuxième version révisée du brouillon du texte de la convention, qui a vu le jour lors [d'une] session précédente, un autre brouillon est soumis par le Canada, la Finlande, la Norvège, la Suède et les Etats-Unis ». Ce groupe de pays, qui est désormais désigné communément sous l'appellation « Groupe de Toronto », propose aux pays émetteurs de choisir entre quatre options de maîtrise de leurs CFC. Cette procédure différenciée doit permettre aux pouvoirs législatifs nationaux les moins coercitifs de rattraper graduellement leur retard. Mais, la

pays où la mobilisation de l'élite scientifique sur la question de l'ozone est faible. Pourtant, dans ces pays, le potentiel de production d'une recherche pertinente pour l'expertise sur la destruction anthropique de l'ozone existe. Les physiciens, mais aussi certains ingénieurs-physiciens, possèdent les compétences techniques pour intégrer le champ d'étude sur l'atmosphère globale (comme nous l'avons montré dans le cas de la France dans le Chapitre 6). Ces nations ont, de plus, des atouts à faire valoir en matière d'instrumentation (longue tradition de spectrométrie, développement de LIDAR, de détecteurs de micro-ondes, *etc.*).[432]

Pour conclure, à la fin des années 1970, il apparaît comme manifeste que, pour obtenir des réglementations plus ambitieuses des ODS, dans le monde, et même aux Etats-Unis (où l'industrie, contrainte par des réglementations, brandit l'argument de la distorsion de concurrence), il faut inciter à la multiplication de chercheurs travaillant sur l'ozone stratosphérique. Des profils de scientifique semblables à ceux que l'on trouve aux Etats-Unis et dans les pays scandinaves doivent voir le jour en Europe, au Japon, en URSS, voire au-delà. L'un des objectifs des CCOL, et de l'ensemble de la coopération scientifique internationale qui va aboutir à la publication du grand rapport de 1985, est d'activer la recherche dans ces pays, tout en insérant les chercheurs dans un processus de travail international, qui vise à produire des rapports annuels, puis 'in fine' un grand rapport international qui fasse autorité.

L'UNEP, l'OMM, la NASA et R. Watson sont sur le pont. Sous leur impulsion, une nouvelle forme d'expertise de l'ozone apparaît au début des années 1980, qui va s'incarner dans le rapport de 1985. Elle se caractérise par : son internationalité, sous égide de l'ONU ; la production d'un document unique de référence pour les négociateurs politiques, avec des rédacteurs appartenant à l'élite du champ scientifique ; une extension maximale des pays représentés ; la participation des industriels.

A partir de 1989, les groupes d'experts internationaux soutenus par l'ONU prendront leur forme définitive, en trois groupes :

- un 'Scientific Assessment Panel' (SAP), qui publie les 'Scientific Assessments of Ozone Depletion' (sur lesquels nous nous sommes focalisés) ;

CEE et le Japon refusent les propositions du Groupe de Toronto. Quant à l'Australie et quelques pays en développement qui participent à la réunion, ils restent alors plutôt en retrait des débats. Les lignes ne bougeront guère avant les négociations au Protocole de Montréal (1986-87), et même avant les dernières heures de ces négociations. A ce moment, l'Australie et quelques pays en développement adopteront une position proche du Groupe de Toronto. [Andersen & Sarma, 2002, pp. 50, 61-66 & 88-91 ; Benedick 1989, p. 48 **in** Litfin, 1994, "Chapter 4", p. 20 of 30]

[432] Il serait urgent de consacrer un travail spécifique à ces traditions nationales, qui n'ont encore fait l'objet d'aucun travail de référence.

- un 'Environmental Effects Assessment Panel' (EEAP) ;
- un 'Technology and Economic Assessment Panel' (TEAP).

Les trois groupes publient conjointement des rapports tous les trois ou quatre ans (1989, 1992, 1995, 1999, 2003, 2007 et 2011).

Dans la foulée du premier rapport OMM/UNEP sur l'ozone, un modèle semblable d'expertise a vu le jour pour le changement climatique. Le GIEC, qui a publié son premier rapport en 1990, est lui aussi composé de trois groupes :

- un groupe « scientifique » (*'Working Group I'*) ;
- un groupe « sur les « impacts, l'adaptation et la vulnérabilité » (*'Working Group II'*) ;
- un groupe sur les moyens d'« atténuer » le changement climatique (en particulier, des moyens de réduire les émissions de GES) (*'Working Group III'*).

Précisons que ce modèle en trois rapports préexiste aux rapports OMM/UNEP sur l'ozone et le changement climatique ; on le rencontre par exemple dans le régime LRTAP sur les pollutions transfrontières, au milieu des années 1980.

7.2. Trou de la couche d'ozone et signature du Protocole de Montréal (1987)

Notre second sous-chapitre se donne pour modeste et périlleuse tâche de présenter en quelques pages des éléments de compréhension d'une période décisive pour l'expertise et la gouvernance de l'ozone : entre 1985, date de publication du premier article des chercheurs britanniques Joseph C. Farman , B.G. Gardiner et J.D. Shanklin sur le trou de la couche d'ozone antarctique [Farman , Gardiner & Shanklin, 1985, "Large losses of total ozone in Antarctica reveal seasonal ClO_x/NO_x interaction"], et 1992, année d'un nouvel amendement du Protocole de Montréal (1987), par lequel les pays développés consentent à cesser la commercialisation de tout produit contenant des CFC, des halons, du tétrachlorure de carbone ou du méthylchloroforme. A partir 1992, l'expertise et la gouvernance de l'ozone basculent dans une phase "routinière" peu médiatisée.

Il est impossible de rendre compte ici de tous les évènements importants qui ont marqué cette période d'accélération de l'histoire qu'ont été les années 1985-92. Ils sont trop nombreux. Nous indiquons simplement quelques points nécessaires à la compréhension de notre récit général. En outre, nous insistons sur le fait que, contrairement à ce que voudrait nous faire croire un récit idéalisé sur la gouvernance "à succès" de l'ozone, l'abandon des CFC et des halons dans les pays industrialisés ne fut pas acquis aisément. De fortes

résistances furent opposées, de la part des pays ouest-européens, du Japon et de l'URSS, ainsi que de la part des industries états-uniennes, pourtant impliquées de longue date dans le processus d'expertise de l'ozone et d'élaboration de substituts aux CFC. Enfin, nous renvoyons le lecteur aux nombreux, foisonnants travaux de SHS sur l'affaire de l'ozone dans la période 1985-92, qui est très bien documentée.

L'événement trou de la couche d'ozone : une icône environnementale, et un nouveau programme de recherche

Premier point. L'association du trou de la couche d'ozone antarctique et de la signature du Protocole de Montréal est profondémment ancrée dans l'imaginaire collectif. Certes, comme l'a montré Karen Litfin, l'existence de mesures corrélant une possible destruction importante d'ozone au-dessus de l'Antarctique et les émissions de CFC, s'ébruite dès 1985 dans les arènes diplomatiques internationales où l'on négocie les termes d'un accord international sur les ODS. Ces résultats sont encore largement soumis à caution en 1987. La mobilisation du principe de précaution est décisive dans le consentement des pays industrialisés à signer le Protocole de Montréal. Comme les opposants à un élargissement des réglementations des CFC, les acteurs qui sont favorables à cet élargissement mobilisent des savoirs multiples pour convaincre. Il s'agit, en particulier, de savoirs produits par les scientifiques de l'atmosphère (sur « l'emploi des savoirs dans les négociations du Protocole de Montréal, nous renvoyons à Litfin, 1994, "Chapter 4"). Et, des images modélisées du trou de la couche d'ozone. Communiquées par la NASA à partir de 1986, ces images seront largement relayées par les médias. Sur la « métaphore du « trou de la couche d'ozone » », la construction des images par la NASA et l'ostention médiatique des images de trou de la couche d'ozone devenue « une icône environnementale », nous renvoyons à Grevsmuehl, 2012, « Partie IV ».

Parmi les acteurs militant pour des réglementations ambitieuses des CFC négociées à l'échelle internationale, on trouve les membres de la « communauté épistémique écologique » qu'a décrite Peter Haas.[433] Qui sont-ils ? Des acteurs qui se rencontrent dans les CCOL, et qui possèdent une légitimité et une autorité scientifique et diplomatique

[433] Comme nous l'avons rappelé dans l'introduction du chapitre, dans son article "Banning Chlorofluorocarbons: Epistemic Community Efforts to Protect Stratospheric Ozone", Peter Haas a décrit une « communauté épistémique écologique ('ecological epistemic community') », qui s'est constituée à partir de la fin des années 1970. Ce groupe d'acteurs aux formations disciplinaires diverses, et travaillant pour des institutions publiques (nationales ou internationales) pour la plupart, partageaient quatre attributs, écrit P. Haas : « (1) un ensemble de croyances normatives et principielles », « (2) des croyances causales » (une croyance dans la véracité de la théorie Molina-Rowland, notamment), « (3) des notions de validité », et « (4) une entreprise politique commune » : la défense de la couche d'ozone [Haas, 1992 (2) & 1991 (1), p. 3].

particulière. P. Haas a particulièrement mis en avant le rôle joué par l'Egyptien Mostafa Tolba, Directeur général de l'UNEP, et l'action de diplomates et représentants d'agences et de ministères nationaux (par exemple, de membres de l'EPA, de Richard Benedick, Député-Secrétaire adjoint de l''US State Department's Bureau of Oceans and International Environmental and Scientific Affairs' (OES) et « chef de la délégation des Etats-Unis pour les négociations » du Protocole de Montréal en 1985-87)[434], de représentants d'ONG… et de scientifiques de l'ozone, regroupés autour de Robert Watson (qui délaisse alors déjà peu à peu la recherche scientifique pour se consacrer à l'action diplomatique sur l'ozone, et plus généralement sur les pollutions globales)[435]. P. Haas s'est particulièrement attaché à décrire le travail réalisé par la communauté épistémique de l'ozone, afin de faire basculer le rapport de force en sa faveur entre 1984 et 1987 – c'est-à-dire, afin d'obtenir la signature d'un protocole international de la part de tous les grands émetteurs d'ODS [Haas, 1992 (b)]. Sur les négociateurs et les négociations de l'ozone des années 1985-92, nous renvoyons à Haas, 1992 (b), Litfin, 1994, Parson, 2003, ou encore à Andersen & Sarma, 2002.

Second point. Les mesures du « trou de la couche d'ozone au-dessus de l'Antarctique » publiées en 1985 offrent une courbe de *tendance longue (qui dépasse la décennie)* de diminution de l'ozone *mesurée dans l'atmosphère*. Les scientifiques adhérant à l'hypothèse Molina-Rowland attendaient une telle courbe depuis dix ans. *La situation s'inverse*. Alors qu'ils avaient jusqu'à présent pu "seulement" mettre en avant *une théorie* chimique de destruction d'ozone établie à l'aide de mesures de laboratoire, les experts de l'ozone se retrouvent à présent en possession d'une courbe de mesures 'in situ', mais sans être en capacité de proposer des mécanismes théoriques qui pourraient l'expliquer.

D'un côté, la communauté scientifique se donne rapidement les moyens de mener des campagnes de mesures afin de confirmer les travaux de Farman et ses collègues. La NASA et la NOAA financent ensemble deux expéditions. D'une part, la 'National Ozone Experiment', réalisée en octobre 1986 dans la station antarctique états-unienne de McMurdo Bay, et dirigée par Susan Solomon (NOAA). D'autre part, l''Airborne Antarctic Ozone Experiment' (AAOE), qui se déroule en octobre-novembre 1987. L'AAOE réunit quatre cents scientifiques sur place (c'est-à-dire « presque tout le monde dans la petite communauté de la recherche

[434] Richard Benedick a publié un long ouvrage *Ozone Diplomacy: New Directions in Safeguarding the Planet*, dans lequel il relate son expérience des négociations sur l'ozone dans années 1980 et les analyse (Benedick, 1991).

[435] Petit à petit, au cours des années 1980, Robert Watson met de côté la recherche scientifique. A partir de la fin des années 1980, il occupera différentes fonctions de technocrate dans des agences et ministères états-uniens et britanniques, des institutions onusiennes (dont, durablement, la Banque mondiale).

stratosphérique », écrivent N. Oreskes et E. Conway). Au cours de cette deuxième expédition antarctique, les scientifiques réalisent des mesures quotidiennes, notamment à l'aide de deux avions qui décollent de Punta Arenas (Chili). Ils réévaluent en outre les mesures passées. Cette expédition est le lieu de genèse d'une courbe dite en forme de « pistolet qui fume ('smoking gun') », qui sera communiquée rapidement. A la fin des années 1980, cette courbe sera présentée comme la preuve la plus fiable de l'existence d'une corrélation entre niveaux élevés de chlore et faibles niveaux d'ozone. Auparavant, en 1985-86, les résultats de J. Farman et ses collègues avaient en outre amené des chercheurs, dont Richard Stolarski du 'Goddard Space Flight Center', à réévaler les mesures spectroscopiques effectuées par TOMS ('Total Ozone Mapping Spectrometer) à bord du satellite Nimbus 7, lancé en 1978. Les scientifiques avaient conclu que l'appareil en orbite avait, en fait, bel et bien détecté la destruction d'ozone, mais que les procédés de traitement automatique des données avaient jugé ces données aberrantes, et les avaient par conséquent rejetées comme telles. [Oreskes & Conway, 2010, pp. 114-121]

Mais, d'un autre côté, les "preuves empiriques" d'une destruction anthropique d'ozone importante au-dessus de l'Antarctique mettent à mal la théorie chimique de l'ozone, que les auteurs du grand rapport de 1985 pensaient être parvenus à stabiliser. Le trou de la couche d'ozone n'est pas seulement un événement politique, mais aussi un événement scientifique. A la fin des années 1980 et au début des années 1990, les chimistes de l'atmosphère vont s'ingénier à inventer de premiers schèmes théoriques aptes à décrire ce phénomène de trou de la couche d'ozone polaire (puisque, dès la fin des années 1980, des campagnes de mesures indiquent qu'un trou "se creuse" aussi en Arctique d'une année sur l'autre – le phénomène étant de moindre ampleur qu'en Antarctique, toutefois). Les scientifiques proposeront en particulier une théorie complexe de chimie hétérogène pour les nuages polaires stratosphériques (ou PSC, pour 'Polar Stratospheric Clouds'). Comme le résume Susan Solomon, cette chimie mêlant phases gazeuse, liquide et solide, établirait un lien théorique entre « une destruction augmentée d'ozone dans les régions antarctique et arctique » et « la chimie hétérogène du chlore qui se produit à la surface des nuages polaires stratosphériques dans des conditions de [très] faibles températures » [Solomon, 1999, p. 275]. Sur la construction de "la science du trou de la couche d'ozone", nous renvoyons au livre de l'épistémologue Maureen Christie (Christie, 2000) et au long article de S. Solomon qui vient d'être cité (Solomon, 1999).

Ecueils scientifiques et diplomatiques

Après 1985, les savoirs scientifiques sur l'ozone mettent quelques années à se stabiliser. N. Oreskes et E. Conway ont donné deux exemples de controverses qui ont éclaté à la fin des

années 1980. Premier exemple. Des météorologistes se sont opposés dans un premier temps aux résultats que leur a présentés Susan Solomon, au retour de "son" expédition de 1986. Ces météorologistes pensaient que les courants atmosphériques ascendants pourraient transporter de l'air troposhérique pauvre en ozone jusqu'à la stratosphère, ce qui créerait « l'apparence d'un trou, bien que nul ozone ne fût détruit dans les faits. Largement citée dans les grands médias, la réponse de Solomon offensa les défenseurs de cette hypothèse météorologique », rapportent Oreskes et Conway. [Oreskes et Conway, 2010, pp. 120-121]

Second exemple. Robert Watson créa en 1986 l''Ozone Trends Panel', qui devait chercher à résoudre le conflit entre les mesures antarctiques des 'Dobson' au sol et celles de TOMS depuis l'espace. Le Panel conclut que les données satellites donnaient bien, comme les 'Dobson', une destruction d'ozone dans les latitudes moyennes en hiver. Toutefois, même après de nouvelles analyses, en 1988, les tendances à la baisse que l'on pouvait dégager avec les données de TOMS étaient toujours « deux fois plus importantes que celles prédites par les modèles théoriques ». [Oreskes et Conway, 2010, pp. 122-123]

Parallèlement à ces difficultés et controverses scientifiques, la signature du Protocole de Montréal et de ses premiers amendements fut acquise de haute lutte. Il suffit, pour s'en convaincre, de lire les ouvrages de Karen Litfin (Litfin, 1994) et d'Edward Parson (Parson, 2003).

Aux Etats-Unis, malgré les appels à légiférer lancés par les scientifiques des grands laboratoires de recherche nationaux sur l'ozone, ainsi que par l'EPA et la Maison Blanche (à partir de 1984, en tout cas), les industriels résistèrent longtemps à toute idée de réglementation supplémentaire des CFC, même dans un cadre réglementaire international. La volte-face de DuPont en septembre 1986, marqua, en tout cas, un tournant au sein de l'industrie des CFC états-unienne. La stratégie de DuPont a été largement commentée dans la littérature. Les auteurs ont cherché à démontrer que les décisionnaires de la firme avaient acquis la conviction que la signature d'un Protocole était devenue inévitable, et que le "géant DuPont" possédait la capacité de mettre sur le marché des substituts des CFC plus rapidement que ses concurrents.[436] Autres acteurs importants aux Etats-Unis : les

[436] Dans une déclaration faite courant septembre 1986, les administrateurs de DuPont reconnaissaient que les résultats synthétisés par l'EPA, l'UNEP et la NASA étaient crédibles et alarmants (même s'ils refusaient encore de parler de réductions drastiques des CFC, préférant reconnaître les risques en cas d'augmentation importante des émissions de CFC), et plaidaient en faveur de la signature d'un protocole international :

« Tous les modèles [- dont celui de DuPont (de Mack McFarland et collègues), donc -] prédisent maintenant que des niveaux de croissance élevée des CFC [*i.e.* des niveaux d'émissions de 3 à 5 fois supérieurs aux niveaux actuels] provoqueraient une destruction significative d'ozone […]. La sagesse qui voudrait que nous laissions croître les émissions ('the wisdom of permitting continued growth') doit être soupesée comparativement aux moyens existants qu'a la science de spécifier un niveau de croissance sans danger à long terme ('a safe long-term growth rate'). Cette [quantification] et celle des incertitudes scientifiques clefs au sujet du problème de l'ozone et des effets des gaz à effet de serre pourraient prendre des décennies ; par conséquent, nous concluons qu'il serait aujourd'hui prudent de limiter les émissions mondiales ('worldwide emissions') de

« marchands de doute » qu'ont décrits E. Conway et N. Oreskes.[437] [Oreskes & Conway, 2010, "Chapter 4. Constructing a counternarrative: The Fight over the Ozone Hole"]

En Europe de l'ouest, en Russie et au Japon, les résistances des industriels sont demeurées très fortes pendant les années qui ont suivi la signature du Protocole de Montréal, jusqu'en 1992 au moins. Les industries de ces nations avaient été impliquées plus tardivement que leurs homologues états-uniennes dans le processus de développement de substituts aux ODS. Enfin, le travail de mobilisation des pays en développement sur les ODP est toujours d'actualité.[438]

Ajoutons, pour finir, que nous aurions pu également mettre l'accent sur la "biopolitique" qui a été mise en place suite à l'alerte du trou de la couche d'ozone : dépistages des cancers de la peau ; appels des pouvoirs publics à utiliser de la crème solaire, à porter des lunettes de soleil, des chapeaux ; programmes d'éducation de l'UNEP dans les pays du "Sud" ; *etc.* La participation des scientifiques de l'atmosphère à cette biopolitique s'est faite par le truchement de l'« Indice UV », qui nous est aujourd'hui devenu familier.

Nous refermerons ce chapitre sur les évènements des décennies 1990-2000, sur lesquelles nous allons nous concentrer dans les deux derniers chapitres de notre mémoire de thèse. Premier point. Les controverses scientifiques au sujet de la destruction anthropique de l'ozone stratosphérique s'apaisent au début des années 1990. Jugeant que la gouvernance de l'ozone a été actée, en Occident, les médias, les « marchands de doute » et les scientifiques de l'atmosphère s'intéresseront désormais principalement au changement climatique.

CFC, pendant que dans le même temps la science s'achemine vers de meilleurs conseils aux décideurs politiques ('while science continues to provide better guidance to policy-makers'). » ['DuPont Position Statement on the CFC-Ozone-Greenhouse Issues', *Environmental Conservation*, 13 (Winter 1986), pp. 363-4 **in** Haas, 1992(2), p. 205]

Le terme *mondial* est décisif. Un "internationalisme" des réglementations est exigé par DuPont. Quelques mois plus tard, il fera également partie des revendications de l'Alliance for Responsible CFC Policy', un consortium d'industries principalement états-uniennes. *Si un nouveau texte venait à naître* (ce qui était devenu plus que probable), déclarera le président de l'Alliance for Responsible CFC Policy' Richard Barnett devant le Congrès des Etats-Unis en mai 1987, l'industrie états-unienne des CFC exigeait qu'il fût « international », pour des raisons de compétitivité transnationale. [Haas, 1992(2)]

[437] Certains « marchands de doute » ont été des détracteurs de la théorie de la destruction anthropique de l'ozone dès le début, et ont perpétué leur œuvre au-delà, en s'attaquant à d'autres expertises publiques sur des problématiques environnementales et sanitaires. Par exemple, Fred S. Singer, a soutenu le projet de SST en 1971 devant le Congrès, en sa qualité de Président du 'Department of Transportation's SST Environmental Advisory Committee', puis a pris pour cible les experts de l'ozone et du GIEC par la suite [Howe, 2010, p. 85 ; Oreskes & Conway, 2010]. Pour une définition de la notion de « marchand de doute », voir notre Chapitre 5.

[438] En 2011, les experts du *Scientific Assessment of ozone Depletion: 2010* écrivaient:

"By 2008, the total tropospheric abundance of chlorine from ODSs and methyl chloride had declined to 3.4 parts per billion (ppb) from its peak of 3.7 ppb. However, the rate of decline in total tropospheric chlorine by 2008 was only two-thirds as fast as was expected. This is because HCFC abundances increased more rapidly than expected, while CFCs decreased more slowly than expected. The discrepancy in CFC decreases is most likely because of emissions from "banks" in existing applications such as refrigerators, air conditioners, and foams. The rapid HCFC increases are coincident with increased production in developing countries, particularly in East Asia. The rate of decline of total tropospheric bromine from controlled ODSs was close to that expected and was driven by changes in methyl bromide." [*WMO/…*, 2011, pp. *E.S. 1 & 2*]

Second point. En 1995, Paul Crutzen, Mario Molina et Sherwood Rowland se partagent le Prix Nobel de chimie pour leurs travaux sur l'ozone stratosphérique. Le prestige associé à cette récompense rejaillit sur la science de l'ozone, et plus généralement sur la chimie atmosphérique. Dans les chapitres qui suivent, nous verrons que de nombreux scientifiques de l'ozone, ainsi que des chimistes de l'atmosphère de profils autres, ont depuis intégré le GIEC. En outre, nous montrerons que certains scientifiques de l'ozone, révélés par l'expertise "à succès" de l'ozone, surent mettre à profit la nouvelle force qui était la leur, pour proposer des voies politiques à suivre en matière de réductions de GES, de géoingénierie, de pollution dans les villes, d'environnement global. C'est le cas de Paul Crutzen, de Mario Molina, de Susan Solomon, de Ralph Cicerone, ou encore de Michael McElroy.

Chapitre 8. L'interface chimie atmosphérique – changement climatique dans les rapports internationaux

Au fil des années 1990, alors que la gouvernance de la couche d'ozone adopte un cours routinier, le changement climatique global s'impose comme l'une des thématiques environnementales les plus médiatisées. Les fortes et croissantes émissions mondiales de GES et d'aérosols sont suspectées d'altérer le climat dès à présent, et de pouvoir le perturber grandement et de manière irréversible à long terme voire à moyen terme. Les principaux risques climatiques mis en avant sont : l'élévation du niveau des océans ; la modification des climats régionaux et des cycles chimiques entre biosphère, atmosphère, cryosphère et océans (et avec eux, la nécessaire adaptation des pratiques agraires et des écosystèmes, la baisse de la biodiversité, *etc.*) ; l'augmentation de la fréquence et de l'ampleur des évènements météorologiques et climatiques extrêmes. A ces risques "climatiques", il faut ajouter l'acidification des océans, dont la principale origine serait, comme pour le changement climatique, le CO_2 anthropique. Au cours des années 1990, de nombreuses communautés de chercheurs en sciences de la nature cherchent à intégrer la problématique du changement climatique à leur agenda de recherche, ou à renforcer sa présence. Ils contribuent, en retour, à consolider le poids de la question climatique dans les arènes scientifiques et médiatiques.

Les chimistes de l'atmosphère ne font pas exception. Trois communautés sont même représentées. Premièrement, les chimistes de l'ozone stratosphérique, qui demeurent la colonne vertébrale de la communauté des chimistes de l'atmosphère globale dans les années 1990, partagent de longue date deux préoccupations avec les scientifiques du changement climatique : l'estimation des transferts radiatifs solaires, et les quantifications d'ozone troposphérique. Deuxièmement, certains chimistes de l'atmosphère ont intégré la Science du Système Terre, en incorporant le réseau que nous avons décrit dans le Chapitre 6, puis en collaborant notamment aux rapports de l'*IGBP* (1988-…). Or, la problématique des effets du changement climatique est omniprésente dans le programme de recherche multi-échelle et ultra "intégré", "holiste", de la Science du Système Terre. Troisièmement, au cours des décennies 1970-80, les spécialistes des pollutions troposphériques régionales ont vu leur science accéder à des échelles spatiales et temporelles plus importantes, notamment avec l'affaire continentale des pluies acides, et avec les études sur les pollutions à l'ozone, au méthane et aux NO_X, à présent jugées d'une importance hémisphérique. Or, l'ozone

troposphérique et le méthane sont de puissants gaz à effet de serre. Autre point de rencontre entre pollutions régionales et CC : les aérosols soufrés, qui posent des problèmes sanitaires dans les grandes agglomérations, mais pourraient également "masquer" de manière importante le réchauffement imputé au GES. A la fin des années 1980, d'éminents chimistes de l'atmosphère globale européens (e.g. Crutzen et Ehhalt du Max-Planck) et nord-américains (e.g. Wuebbles, du LLNL) s'ingénient à définir des programmes de recherche sur les actions réciproques entre le phénomène de changement climatique, et les processus de formation, transformation et destruction chimique des GES et aérosols dans l'atmosphère [Crutzen & Golitsyn, 1992 ; *IPCC (WG I)*, 1990, p. 50]. Dernière évolution, dont nous verrons qu'elle génère également à des études chimie-climat : des études transcontinentales menées depuis une quinzaine d'années ont concouru à imposer le concept de « qualité de l'air (à l'échelle) globale ('global air quality') » [*IPCC (WG I)*, 2007 & 2014].

Depuis le tournant des années 1990, les publications sur le changement climatique ont proliféré. Outre la littérature des sciences de la nature, outre les récents "mémoires entre science et politique" de grandes figures de la science du CC (Schneider, Hansen),[439] s'est développé un important corpus de STS et de sciences politiques (qui fait souvent écho à des analyses d'économistes et de spécialistes du droit de l'environnement). A l'inverse de la gouvernance de l'ozone, la gouvernance internationale du CC est rarement décrite comme une 'success story'. Une telle formulation relève même de la litote, même si des auteurs ont concédé aux scientifiques du GIEC et aux forums hybrides du « régime climatique » d'être parvenus à offrir une importance vitrine médiatique à la problématique du changement climatique, ainsi qu'à stimuler le développement d'énergies renouvelables. S'il n'est pas de notre ressort de rentrer dans le détail des politiques climatiques, notre travail d'historien sur l'expertise climat-chimie atmosphérique est par contre tributaire de conclusions tirées par les sciences sociales sur les politiques environnementales et économiques des années 1990-2000, et en particulier sur le « régime climatique » [Dahan, 2007 ; Dahan *et al.*, 2010]. A ce stade introductif, nous mettrons en avant trois évènements bien identifiés.

Premièrement, l'expertise du GIEC a été, depuis ses débuts, vivement attaquée, en particulier aux Etats-Unis. Cet aspect est important pour comprendre la légitimité publique des atermoiements des administrations états-uniennes successives à s'engager dans un processus de décarbonisation de l'économie. Néanmoins, disons-le dès à présent, nous ne consacrerons pas d'examen particulier à l'aspect "controverse scientifique sur le changement climatique" dans ce chapitre, dans la mesure où, à de rares exceptions près, *les arguments*

[439] *Cf.* Hansen James, 2010, *Storms of My Grandchildren*, Bloomsbury; Schneider Stephen, 2009, *Science as Contact Sport*, Ed. National Geographic.

scientifiques engagés dans la controverse ne sont pas liés au caractère chimiquement réactif des composés atmosphériques. La genèse photochimique de l'ozone troposphérique, la destruction chimique du méthane dans l'atmosphère, l'impact radiatif du méthane, le rôle radiatif "masquant" des aérosols soufrés, l'oxydation du SO_2 dans les nuages, les propriétés radiatives des nuages ou du carbone suie (qui font intervenir des réactions chimiques hétérogènes), ou encore l'impact de la destruction puis de la reconstitution de l'ozone stratosphérique ont, certes, suscité, et continuent de susciter des débats au sein de la communauté scientifique. Mais, à l'inverse du rôle des variations de flux solaires au cours des âges, de l'effet de serre de la vapeur d'eau atmosphérique, ou encore de la courbe dite « en forme de crosse de hockey », ces aspects n'ont jamais fait l'objet d'une controverse virulente de la part d''outsiders' au GIEC. Aussi, nous contenterons-nous de signaler, au fil de nos analyses, les savoirs sur le rôle des interactions chimiques atmosphériques dans le changement climatique que les scientifiques du GIEC jugent peu « robustes ». [Oreskes & Conway, 2013 ; Oreskes & Conway, 2010 ; Conway, 2008, pp. 238-239 ; Guillemot & Aykut, 2013]

Deuxièmement, les premiers pas de la gouvernance de l'ozone précèdent de quelques années seulement ceux de la gouvernance du CC. Les institutions et le cadrage théorique de la première gouvernance ont même fortement inspiré la seconde. Nombreux sont les auteurs, et en particulier les scientifiques de l'ozone, qui désignent la gouvernance de l'ozone comme l'exemple à suivre, et continuent aujourd'hui de puiser en elle des idées pouvant servir la gouvernance climatique [Molina, 2010 ; Daniel *et al.*, 2012]. D'autres ont, au contraire, critiqué cette « dépendance au sentier ». L'auteur STS Reiner Grundmann a déploré que, alors que les émissions de CO_2 ne sont pas limitées à quelques secteurs industriels "isolés" comme l'étaient les émissions d'ODS, le cadrage du changement climatique a néanmoins principalement consisté à négocier des objectifs de réduction d'émissions de GES émis par de grandes installations industrielles (centrales électriques, producteurs d'acier, usines de pâte à papier, *etc.*) [Grundmann, 2002 & 2005 ; Prins *et al.*, 2010]… En tout cas est-ce ainsi que le Protocole de Kyoto fonctionne en grande partie, c'est-à-dire sur le modèle du Protocole de Montréal. Outre l'héritage politique qu'il laisse, le cas de l'ozone est, en outre, *un événement épistémologique* et *symbolique décisif*, puisqu'il démontrerait que des entités environnementales globales peuvent être endommagées de manière irréversible par l'homme, que des « équilibres » globaux peuvent être « rompus » par l'homme (*Cf.* Mégie, 1989, *Ozone – l'équilibre rompu*).

Troisièmement, alors que la gouvernance de l'ozone aurait pu être relativement efficace même sans la participation des pays en développement, la limitation du réchauffement climatique à +2°C semble conditionnée par une implication à moyen terme,

voire même à court terme, des PVD, et surtout des Grands pays émergents. Pour l'heure : de l'Inde, du Mexique, du Brésil, et surtout de la Chine, dont les émissions annuelles de CO_2 ont dépassé celles des Etats-Unis au tournant des années 2010. Le CO_2 n'est, en outre, pas le seul polluant atmosphérique émis par la Chine et ses voisins. Du fait du développement industriel spectaculaire de l'Asie de l'Est et du Sud depuis les années 1990, cette région surpeuplée est devenue la principale émettrice de particules soufrées, de précurseurs d'ozone et de carbone suie, composés qui, du fait de leurs propriétés radiatives, deviennent de vrais enjeux climatiques s'ils se retrouvent en concentration importante dans l'atmosphère. Aux aérosols soufrés, au carbone suie et à l'ozone, il faut ajouter le méthane, puissant gaz à effet de serre émis notamment par les troupeaux d'élevage et la riziculture, et dont la chimie est couplée à celle de l'ozone et à ses précurseurs (des pollutions urbaines pour la plupart, dont le monoxyde de carbone). Or, outre leurs propriétés radiatives, les smogs soufrés (d'aérosols soufrés) et les smogs photochimiques (incluant l'ozone) posent des problèmes sanitaires. Les « mégacités » chinoises sont aujourd'hui en proie à des évènements de pollutions photochimiques et particulaires spectaculaires et délétères, alors que les épisodes de précipitations acides se multiplient en Asie de l'Est. Au-delà de ces enjeux régionaux, la pollution de fond globale à l'ozone, et plus généralement le phénomène de « pollution de l'air global » (qui est en fait la plupart du temps une pollution de l'air « hémisphérique »), font l'objet d'études plus poussées depuis une dizaine d'années, souvent dans le cadre de coopérations entre chercheurs occidentaux et chinois sur la pollution dans les « mégacités ». Parallèlement, conseiller les décideurs politiques sur une action conjointe raisonnée de réductions des pollutions urbaines et de lutte contre le CC devient un programme d'expertise pour les chimistes de l'atmosphère.

Dans la continuité de ce que nous avons fait dans le reste de la thèse, nous montrons dans ce dernier chapitre comment les intérêts scientifiques et politiques pour le changement climatique, découplés depuis le tournant des années 1990, ont changé les pratiques des chimistes de l'atmosphère, et réciproquement.[440] Nous montrons comment, à partir de la fin des années 1980, les chimistes de l'atmosphère s'immiscent dans l'infrastructure du changement climatique et l'étendent. Nous ne nous attarderons pas sur les missions satellites (Exemple récent : l'ACE, 'Atmospheric Chemistry Experiment'), les réseaux de mesures

[440] A toutes fins utiles, précisons que, dans ce chapitre sur la chimie atmosphérique et le CC, nous traiterons la période étudiée (1990-2013), tour à tour comme "*une*", ce qu'elle est sous certains aspects (régime "GIEC-UNFCCC" ; "leadership européen" ; pas d'action politique entreprise pour atteindre des objectifs globaux suffisants de réduction des émissions de CO_2, *etc.*), ou comme "le lieu de ruptures" (en 1997, à Kyoto ; à la fin des années 2010, avec les projections plus alarmistes du GIEC, la montée en puissance des thématiques de l'adaptation et de la géoingénierie, l'échec de Copenhague, *etc.*).

(GCOS, ACCENT) et les bases de données[441] que les chimistes de l'atmosphère globale jugent précieux dans leur contribution à la science du CC. Nous nous focaliserons principalement sur une composante particulière de la science climatique, les modèles numériques, qui détiennent un pouvoir politique important du fait de leur capacité à nous projeter dans des futurs. Ils sont, de plus, le lieu d'une coopération incontournable entre communautés disciplinaires. A ce propos, les années 1990-2000 sont le lieu d'une « pluridisciplinarité croissante » dans les pratiques des chimistes de l'atmosphère globale. Elle se réalise autour des travaux sur les rétroactions chimie atmosphérique-changement climatique et leurs modélisations, mais également, comme nous le verrons, par la participation des chimistes de l'atmosphère à l'élaboration d'une science du système Terre.

Notre chapitre s'ouvre sur une brève, mais incontournable introduction au régime climatique. Elle décrit le processus "inaccompli" de montée de l'urgence climatique dans les arènes politiques états-uniennes et internationales, au cours des années 1990 (Sous-chapitre 8.1). Dans un deuxième Sous-chapitre, nous décrivons comment certains substituts aux CFC ont été pris en charge par le Protocole de Kyoto, alors que, "en retour", la réduction rapide des CFC par le Protocole de Montréal a permis de mitiger un petit peu l'effet de serre d'origine anthropique (puisque les CFC sont des GES très puissants). Par ailleurs, nous décrivons le couplage croissant de l'ozone stratosphérique et du changement climatique dans les 'Scientific Assessments of Ozone Depletion'. Dans le dernier rapport daté de 2011, deux paragraphes sont même consacrés à une technique de géoingénierie pour contrebalancer le changement climatique, l'injection de particules soufrées dans la stratosphère (8.2).[442]

Le troisième Sous-chapitre est consacré à l'entrée progressive de la chimie atmosphérique dans les modèles numériques retenus par le GIEC. Nous nous focalisons surtout sur la chimie troposphérique (beaucoup plus décisive, dans le cas du CC, que la chimie stratosphérique), et en particulier sur l'introduction de modèles de chimie à trois dimensions (nombre maximal de dimensions pour les modèles). Le choix du corpus des rapports du GIEC s'explique par le caractère hautement politisé des simulations numériques

[441] Par exemple, le programme GAW s'appuie sur six 'data bases' :
i) 'World Ozone and UV radiation Data Centre' (WOUDC ; abrité par l''Environment Canada') ;
ii) 'World Data Centre for Greenhouse Gases' (WDCGG ; 'Japan Meteorological Agency') ;
iii) 'World Data Centre for Aerosols' (WDCA ; 'Norwegian Institute for Air Research') ;
iv) 'World Radiation Data Centre' (WRDC ; 'Main Geophysical Observatory de Saint Pétersbourg) ;
v) 'World Data Centre for Precipitation Chemistry' (WDCPC ; 'Illinois State Water Survey') ;
vi) 'World Data Centre for Remote Sensing of the Atmosphere' (WDC-RSAT ; 'German Aerospace Centre').

[442] Le terme géoingénierie englobe l'ensemble des technologies visant à altérer intentionnellement un ou plusieurs paramètres environnementaux définis comme planétaires. Depuis les années 1970, les débats portent presque exclusivement sur des propositions de techniques potentiellement aptes à contrebalancer le changement climatique d'origine anthropique (injection d'aérosols dans la stratosphère, fertilisation des océans, blanchissement des nuages marins, arbres artificiels, *etc.*). Plusieurs types de technologies sont discutés, par des communautés de scientifiques et d'ingénieurs différentes (voir par exemple Vaughan N. & T. Lenton, 2011).

du GIEC. L'identification de l'entrée de tel ou tel type de modèle de chimie dans la science du GIEC constitue un premier travail, qui révèle la montée en puissance de certaines thématiques nouvelles, sous l'impulsion de chimistes de l'atmosphère. En outre, ce travail permet, dans un second temps, de tracer les généalogies de la recherche qui ont mené à l'intégration de telle ou telle question de chimie, et de telle ou telle communauté de chercheurs, dans la science du CC.

8.1. Introduction. « Régime climatique » et communauté scientifique

Dans ces quelques pages introductives, nous passons en revue quelques dynamiques de l'expertise du CC, qui ont été identifiées par les auteurs de SHS ayant travaillé sur la science du changement climatique au XX^{ème} siècle et sur le « régime climatique » des années 1990-2000. Il s'agit, en particulier, de mettre en exergue quelques évènements politiques qui ont compté pour la communauté des scientifiques du CC.[443]

Le changement climatique jusqu'au milieu des années 1980

La période antérieure aux années 1990 n'est pas décisive pour nous, dans la mesure où la chimie n'est alors guère prise en compte par les scientifiques du changement climatique. Rares sont les chimistes de l'atmosphère qui se sont jusqu'alors intéressés à la thématique du changement climatique (même si, dans les chapitres précédents, nous sommes parvenus à en donner des exemples au sein de la communauté des chimistes de la stratosphère et des scientifiques des atmosphères planétaires). Nous en proposerons donc simplement une rapide description.

L'histoire de l'élaboration théorique du changement climatique global par émissions anthropiques de CO_2 remonte à la fin du XX^{ème} siècle. On retient généralement l'article de Svante Arrhenius de 1896 ("On the Influence of Carbonic Acid in the Air upon the Temperature of the Ground"), et les débats qui ont suivi au sein de l'Académie royale des sciences de Suède, notamment entre Arrhenius et Nils Ekholm. La thématique demeure marginale au sein de la communauté scientifique jusqu'aux années 1950, malgré les travaux de Guy Callendar sur l'effet de serre, notamment [Fleming, 2007(c)]. Les années 1950-60 constituent un premier tournant, avec de premiers encarts au sujet d'un possible changement climatique d'origine anthropique dans la presse grand public états-unienne, et surtout avec

[443] Pour un introduction au « régime climatique internationale » en français, nous renvoyons à Aykut, 2010, Partie A.

l'élaboration des premiers modèles de circulation générale (GCM, 'Global circulation models'). Dans les années 1960, certains membres de l'élite états-unienne, météorologistes-modélisateurs (Rossby, Charney, Neumann, Wexler), océanographes (Revelle) et géophysiciens, proposent la création du 'National Center for Atmospheric Research' (NCAR), rendue effective en 1960. A ses débuts, le changement climatique n'est qu'un aspect subsidiaire du programme du NCAR. Et le NCAR est initialement financé, non seulement par la NSF (National Science Foundation), mais également par le Department of Defense et l''Office of Naval Research' (ONR) [Hart & Victor, 1993 ; Howe, 2010, p. 47].

Les années 1960, et surtout 1970 voient l'émancipation progressive des scientifiques de l'atmosphère et du climat de la tutelle militaire. Parallèlement, des études empiriques montrent l'augmentation des concentrations annuelles moyennes de CO_2 dans l'atmosphère (*cf.* les mesures du chimiste David Keeling à Mauna Loa (Hawaï), lancées en 1957 lors de l'AGI, à la demande de Revelle), et des tendances de CO_2 à long terme sont établies à l'aide des techniques de datation au carbone 14 ou à l'aide de carottes glaciaires, et corrélées à des températures moyennes globales [Doel, 2009, pp. 155-157]. "Symétriquement", de premières simulations numériques, dont celles du météorologiste et climatologue Syukuro Manabe à la NOAA, indiquent que la température globale sera significativement affectée par une hausse de CO_2. Mais, si l'influence des activités humaines sur le climat global semble établie, l'impact radiatif des aérosols demeure très difficile à quantifier, et avec eux la tendance, au réchauffement ou au refroidissement, des températures de l'atmosphère à attendre dans les décennies à venir. [Hart & Victor, 1993]

A la fin des années 1970, un consensus sur le réchauffement commence à se dégager au sein de la communauté scientifique. Au début des années 1980, les réflexions sur des possibles politiques de lutte contre le changement climatique emboitent le pas de celles sur les réductions de substances potentiellement destructrices de l'ozone stratosphérique. Elles portent sur trois options : la « prévention » (réduction des émissions de CO_2) ; la « compensation » (afforestation et technologies de géoingénierie) ; l'adaptation. Dans un contexte où les prévisions sur les changements climatiques futurs demeurent très incertaines (en particulier, en ce qui concerne les impacts régionaux) et sont de toute façon rarement alarmistes, dans un contexte où la coopération environnementale internationale est encore balbutiante et où la géoingénierie pose des problèmes géopolitiques que beaucoup jugent dirimants dans le contexte de Guerre froide, de nombreux auteurs préfèrent, à ce stade, militer pour des aides à l'adaptation à destination des pays pauvres, qui seront probablement les plus touchés par les changements climatiques et les plus vulnérables. Les baisses d'émissions de CO_2 n'en sont pas moins jugées indispensables sur le long terme, dans

la mesure où le CO_2 possède une longue durée de vie, et s'accumule donc dans l'atmosphère. [Meyer-Abich, 1981]

Au milieu des années 1980, la plupart des rapports scientifiques convergent vers des conclusions plus voisines, et aussi plus alarmistes, au sujet des répercutions climatiques des émissions de CO_2. Parallèlement, le changement climatique est mis à l'agenda politique international : un « régime climatique » se construit, entre science, expertise et politique [Dahan-Dalmedico, 2007]. En 1985, se tient la Conférence internationale de Villach « sur l'évaluation du rôle du dioxyde de carbone et d'autres gaz à effet de serre dans les variations du climat, et autres conséquences connexes ». En 1988, au lendemain de la signature historique du Protocole de Montréal (1987), des climatologues de renom tirent la sonnette d'alarme, dans le cadre des comités mis en place par le Congrès des Etats-Unis, et lors de la Conférence de Toronto sur « l'atmosphère en évolution : implications pour la sécurité du globe » (27-30 juin 1988) organisée sur les recommandations du rapport *Notre avenir à tous*, dit Rapport Brundtland (1987 ; ONU).

La même année, un Groupe d'experts Intergouvernemental sur l'Evolution du Climat (GIEC) est créé. Il est placé sous l'égide des institutions onusiennes OMM et UNEP. Le GIEC est composé de trois groupes d'experts qui, pilotés par des scientifiques appartenant à l'élite de leur discipline, produisent chacun une synthèse destinée aux décideurs politiques. Le Groupe I du GIEC, est composé de scientifiques de la nature – dont des chimistes de l'atmosphère –, issus pour la plupart de la recherche publique. Les Groupes II et III regroupent des universitaires des sciences de la nature (climatologues, écologues, épidémiologistes, *etc.*) et des SHS (économistes, politistes, *etc.*), des fonctionnaires des institutions environnementales d'Etat, des cabinets de conseil privés, des industriels, des ONG. Les rapports du GIEC servent de base aux négociations internationales sur le climat. Celles-ci sont définitivement lancées en 1992, avec la signature de la Convention-cadre des Nations unies sur les changements climatiques (UNFCCC, 'United Nations Framework Convention on Climate Change') par la grande majorité des Etats, dont l'ensemble des gros émetteurs de GES, au cours du Sommet de la Terre (ou Conférence des Nations unies sur l'environnement et le développement ; Rio de Janeiro).[444] La convention entre en vigueur dès 1994, et la première COP ('Conference of the Parties') du climat se tient à Berlin en 1995.[445]

[444] La structure de la gouvernance du CC, avec négociations sous la forme de COP et MOP (établies par l'UNFCCC de 1992) et rapports de trois groupes d'experts (le GIEC), est identique à celle de la gouvernance de l'ozone (dont les COP et MOP avaient été déclarées ouvertes par la Convention de Vienne de 1985). Toutefois, ce type d'institutionnalisation est plus ancien que la gouvernance internationale de l'ozone. La Convention LRTAP (Convention on Long-range Transboundary Air Pollution) de l'UNECE (United Nations Economic Commission for Europe), imaginée principalement pour lutter contre les pluies acides en Europe et signée à Genève en 1979, possédait elle aussi ses réunions de parties, qui négociaient sur la base de rapports élaborés par trois groupes d'experts semblables à ceux des 'Ozone Assessments' et du GIEC ('Steering Body to EMEP', 'Working Group on

« Mode de vie non négociable » et « climatoscepticisme » aux États-Unis, des premiers pas du régime climatique à la "non-signature" du Protocole de Kyoto (1997)

Alors que le Protocole de Montréal avait été signé "sous 'leadership'" états-unien, le Congrès des Etats-Unis va se montrer beaucoup plus réticent à adopter des objectifs de réductions de CO_2, et s'opposera finalement à la signature du Protocole de Kyoto (1997). Pourtant, le pays concentre les principaux théoriciens du changement climatique. Et, peu avant que des records de chaleur ne soient battus aux Etats-Unis, lors de l'été 1988, d'éminents climatologues délivrent des prédictions alarmistes au sujet du changement climatique, dont James Hansen de la NASA, le 24 juin 1988, dans le cadre d'une série d'allocutions de scientifiques devant le Congrès, réclamées par des leaders démocrates. Dans un climat d'élection présidentielle propice à la démagogie, le Vice-Président républicain en campagne et futur vainqueur, George Bush, promet de contrer « l'effet de serre avec l'effet Maison blanche » !, c'est-à-dire de prendre la menace climatique au sérieux [Bush G., 1988 **in** Conway, 2008, p. 238].

Nous savons qu'il n'en fera rien, « le mode de vie américain n'[étant] pas négociable (Bush G., 1992) ». En outre, un climat de « climatoscepticisme » va se développer dans l'opinion publique états-unienne, dont l'administration Bush est en partie responsable, ayant elle-même relayé des expertises de 'think tanks' libéraux et conservateurs, qui poursuivaient de toute évidence une campagne, plus médiatique que scientifique, de décrédibilisation des expertises dominantes. Au début des années 1980, le GIEC cristallise déjà la plupart des critiques.[446] Les positions scientifiques du GIEC sont pourtant – et ont demeuré depuis –

Effects', 'Working Group on Strategies and Review'). Quant à la première COP de la Convention sur le commerce international des espèces de faune et de flore sauvages menacées d'extinction (CITES, 'Convention on International Trade of Endangered Species', accord intergouvernemental signé en 1973), elle s'était tenue à Berne dès novembre 1976, soit treize ans avant la COP1 sur l'ozone (Helsinki, 1998) et dix-neuf ans avant la COP1 sur le CC (Berlin, 1995).

[445] Pour une histoire longue du changement climatique "entre science et politique", nous renvoyons à Edwards, 2010, *A Vast Machine. Computer Models, Climate Data, and the Politics of Global Warming*.

[446] L'expertise du GIEC a été vivement attaquée en Amérique du nord et en particulier aux Etats-Unis – beaucoup plus qu'en Europe, et plus que partout ailleurs dans le monde semble-t-il (même si nous connaissons mal le cas russe, par exemple). On retrouve parfois les mêmes acteurs que ceux qui avaient cherché à décrédibiliser les expertises internationales du trou de la couche d'ozone – par exemple, Fred Singer. Oreskes et Conway ont décrit la campagne de « déni climatique », en insistant sur le rôle décisif de grandes figures scientifiques, qui avaient fait l'essentiel de leur carrière dans la recherche publique mais "hors science de l'atmosphère et du climat" (à l'exception de Fred Singer, qui étudia la haute atmosphère dès le début des années 1950, puis fut nommé en 1962 premier directeur des services de satellite météorologique pour le 'National Weather Satellite Center'). Oreskes et Conway ont nommé ces acteurs « marchands de doute ». Ils ont montré que leurs agissements ont souvent été perpétrés dans le cadre d'une activité de communication plus large, entreprise par des 'think tanks' conservateurs et/ou néolibéraux (que ces « marchands de doute » ont parfois créés eux-mêmes ; ainsi, le scientifique de la physique du solide Frederick Seitz, l'astronome Robert Jastrow et le physicien William Nierenberg, co-fondateurs du 'George C. Marshall Institute'). Certains de ces organismes privés, financés par l'industrie pétrolière, minière, *etc.*, ont précocement influencé les débats sur le CC aux Etats-Unis. Erik Conway a montré que l'administration Bush père (1989-1993) avait – dans un premier temps, tout le moins – accordé une crédibilité importante aux conclusions du 'Marshall Institute'. Et, Erik Conway et

presque parfaitement alignées sur celles de trois des quatre grandes institutions de la science du changement climatique aux Etats-Unis : le NCAR, la NOAA et la NASA.[447] En outre, l'attitude « sceptique » du gouvernement Bush ne l'empêche pas de promouvoir la recherche sur le changement climatique. On peut y voir, à la fois une manœuvre qui s'inscrit dans la logique des « marchands de doute » (nous aurions besoin de plus de science afin d'être certains de la réalité de l'urgence climatique), et une stratégie, maintes fois éprouvée, pour donner l'impression de se préoccuper d'une problématique environnementale en finançant la recherche sur le sujet, tout en tenant des discours défaitistes sur les possibilités politiques de prendre des mesures immédiates pour la résoudre [Conway, 2008, pp. 238-239 ; Oreskes & Conway, 2010]. Le Président Bill Clinton (1993-2001) se montre plus préoccupé et volontaire que son prédécesseur, mais le Sénat américain rejette la possibilité de parapher le

Naomi Oreskes ont établi que, de manière continue depuis la fin des années 1980, des lobbies anti-réglementations des GES ont agi en sous main, afin que les élites politiques et l'opinion publique états-uniennes soient très réticentes à contracter un engagement contraignant de baisse des émissions de GES. [Conway, 2008, pp. 238-239 ; Oreskes & Conway, 2010]

Par ailleurs, Reiner Grundmann a attribué une partie du climato-scepticisme à l'empressement montré pour monter un groupe d'expert international sur le changement climatique. D'après lui, « l'institutionnalisation d'une communauté épistémique sous la forme du GIEC [se serait] faite [trop] tôt. » L'auteur STS défend que la précocité de la création du GIEC, en 1988, c'est-à-dire au moment-même de la première grande éruption médiatique de la thématique du CC aux Etats-Unis, aurait « supprimé la possibilité d'une controverse ouverte » et de création d'un « climat d'attente » dans le pays au sujet du CC. Ceci aurait « donné aux 'outsiders' l'opportunité de se faire un nom dans les médias et de jeter efficacement le doute sur le consensus » délivré par le GIEC. Alors que, pense Grundmann, un processus de controverse ouverte plus long sur la réalité et la dangerosité du CC aurait, au contraire, pu permettre progressivement aux avocats des réglementations de « gagner en crédibilité publique », de mettre hors jeu les 'outsiders' par la preuve scientifique, ainsi que de mobiliser plus fortement les décideurs politiques et le grand public, donc en définitive de lutter plus efficacement contre les détracteurs – processus long que Grundmann dit avoir observé, pour les Etats-Unis, dans le cas de la destruction de la couche d'ozone stratosphérique. Et l'auteur de conclure : l'effort pour établir un consensus scientifique s'est révélé « quelque peu contreproductif », puisqu'il « a volé à la controverse une dynamique essentielle » [Grundmann, 2002, pp. 412-413]. Toutefois, comme le montrent nos conclusions (Chapitres 4 à 8), la perspective adoptée par Grundmann est trop restreinte, à la fois au sujet de l'ozone et du CC. Le "succès" et "l'échec" des deux controverses sont éminemment plurifactoriels. De plus, la rapidité de mobilisation d'universitaires au sein du CIAP (1971-75) avait, certes, donné du grain à moudre à l'industrie privée, qui avait pu légitimement présenter la science de la destruction de la couche d'ozone comme immature, dans les médias ; mais, cette diligence avait également été la nécessaire condition à de premières réglementations des CFC aux Etats-Unis, dès 1977, un antécédent qui allait insuffler de l'ardeur à une "communauté épistémique écologique" (principalement états-unienne), désormais sur les rails qui mèneraient au Protocole de Montréal (1987) [Haas, 1992 (2)]. De tels antécédents n'existent certes pas pour les GES aux Etats-Unis. Toutefois, il semble indubitable que le travail du GIEC ait mobilisé, et continue de mobiliser certains citoyens et certaines élites politiques en faveur de baisses des émissions de GES.

[447] La quatrième grande institution de la science du CC, le 'Department of Energy' (DoE), qui finance les Laboratoires nationaux (le LLNL notamment, important pourvoyeur de modélisations pour le GIEC), a une position moins ferme. Certes, aucun de ses rapports sur le changement climatique, quelle que soit sa nature (ils sont pourtant très divers, portant souvent sur des types particuliers de technologies de substitution), ne cherche à récuser l'existence d'un phénomène de changement climatique d'origine anthropique alarmants. Mais, la rhétorique du DoE doit composer avec l'obligation d'insister sur l'urgence à agir, et l'apport de moyens qui seront longs à mettre en place, et dont la croissance sera nécessairement limitée car contestée par les mouvements environnementalistes. Le DoE se retrouve "pris en étau" entre son activité de recherche sur le changement climatique, et son activité de conseil sur les solutions à mettre en œuvre pour atteindre les impératifs nationaux de moindre dépendance énergétique et de baisse des coûts de l'énergie. Pour le dire autrement, son mandat est 'solution-oriented'. Et, précisons-nous, les solutions qu'il propose sont, pour la plupart, des 'technological fixes' des plus gigantesques, des plus "brutaux" : centrales nucléaires, grands barrages, grandes exploitations de gaz & pétrole de schiste et de biocarburants… Sans oublier l'intérêt atypique que le DoE porte à la géoingénierie depuis sa création en 1979 (en particulier, au sein du LLNL) [Briday, 2014].

Protocole de Kyoto (1997). Le Vice-Président Albert Gore a pourtant activement plaidé en faveur de son adoption (même s'il a aussi demandé un engagement plus important de la part des pays en développement). Dix ans plus tard, Al Gore partagerait le Prix Nobel de la Paix 2007 avec les auteurs du quatrième rapport du GIEC, « pour leurs efforts de collecte et de diffusion des connaissances sur les changements climatiques provoqués par l'Homme, et pour avoir posé les fondements pour les mesures nécessaires à la lutte contre ces changements ». Dans les années 2000, la présidence des Etats-Unis est aux mains de George W. Bush, qui s'inscrit dans la droite ligne de son père.

Des analystes des débats climatiques ont recensé quatre contestations récurrentes des conclusions du GIEC dans l'arène médiatique :

(i) les deux "marottes climatosceptiques", qui ne sont plus jugées dignes de débat dans le monde académique aujourd'hui : le rôle prétendument central des variations de flux solaires au cours des âges et de l'effet de serre de la vapeur d'eau atmosphérique, comme facteurs explicatifs du réchauffement observé ;

(ii) les sempiternels (et divers) suspicions à l'égard des modélisations numériques ;

(iii) la remise en question du seuil +2°C comme marquant une limite au-delà de laquelle l'adaptation sera très difficile et très onéreuse ;

(iv) la controverse au sujet de la courbe dite « en forme de crosse de hockey », que les auteurs du troisième rapport du GIEC (2001) avaient placée au premier plan. Cette courbe de température moyenne au cours du dernier millénaire, qui montre une augmentation spectaculaire de température depuis 1900 (d'où son nom), a été établie, pour les époques anciennes, grâce à une méthode statistique exploitant des données d'anneaux de croissance des arbres, de coraux et de carottes glaciaires [Guillemot & Aykut, 2013]. Celle-ci a été vivement attaquées, non seulement par des universitaires, mais aussi par le biais d'une campagne de diffamation orchestrée par des industriels et le Parti républicain (comme le raconte l'une de ses victimes, le climatologue états-unien Michael Mann, dans un ouvrage de 2012 intitulé *The Hockey Stick and the Climate Wars. Dispatches From the Front Lines*).

Enfin, des débats de grande valeur aux yeux des scientifiques du CC continuent de se dérouler, sans rencontrer le même succès médiatique : la valeur de la hausse du niveau des mers ; la représentation des nuages dans les modèles ; le rôle des aérosols ; ou encore, l'attribution des événements extrêmes au réchauffement global [Guillemot & Aykut, 2013]. Parmi toutes ces controverses, seules la représentation des nuages dans les modèles et la

composition chimique des aérosols (et donc leur rôle radiatif) incombe aux chimistes de l'atmosphère (et encore, en partie seulement).

La remise en question de la logique de Kyoto

A l'inverse des Etats-Unis, les pays de l'UE ratifient le Protocole de Kyoto en 1997. Ils endossent par ce biais le 'leadership' de la lutte contre le changement climatique. Mais, aucun effet d'entraînement n'est observé. En décembre 2009, les négociations de la COP n° 15 de Copenhague, dans lesquelles de nombreux pays européens et ONG ont placé l'espoir de ratification d'un nouvel accord contraignant étendu à de nouveaux pays, accouchent d'une souris.[448] Cet "échec de Copenhague" a largement été interprété, qui comme un revers majeur pour la diplomatie climatique, qui comme la fin d'une l'illusion trop longtemps entretenue (*Cf.* e.g. Prins *et al.*, 2010, *The Hartwell Paper: A New Direction for Climate Policy after the Crash of 2009*). Le « miracle diplomatique de l'ozone »[449] n'était pas reproductible (peut-être moins encore en 2009, en pleine crise économique mondiale).[450] Certes, la COP de Doha de décembre 2012 a entériné la reconduction du Protocole de Kyoto pour une deuxième période d'engagement de huit ans (2014-2020). Mais, un an plus tôt, Canada s'est retiré du protocole. Il est aujourd'hui devenu indéniable que la logique du Protocole de Kyoto, qui passe principalement par la prescription d'objectifs de réduction de CO_2 dans les grandes installations industrielles (comme le faisait le Protocole de Montréal), est, sinon défaillante, tout le moins insuffisante, et inapte à coopter les Etats-Unis et les Grands émergents, qui sont pourtant les pays principaux émetteurs de GES.

Les années 2000 et le début des années 2010 ont été une période de grand 'brainstorming' pour trouver des approches complémentaires ou alternatives à Kyoto, afin

---

[448] Seule nouveauté marquante validée lors de la COP 15 : la création d'un Fonds vert pour le climat de quelques milliards de dollars par an, à destination des pays en développement. A l'heure où nous écrivons (mi-2014), l'alimentation de ce fonds n'est toujours pas garantie.

[449] Le politiste Agrawala Shardul attribue cette expression « reproduire le miracle de l'ozone [pour le climat] » au Président de l'UNEP Mustafa Tolba, à l'époque de la signature de la Convention de Vienne (1985). Il écrit :

> "While assessments like NRC (1983) emphasized scientific uncertainties and advocated a cautious 'wait and see' approach, an EPA assessment published the same year painted a dramatically different picture with potentially catastrophic consequences resulting from uncontrolled climate change (EPA, 1983).
>
> "Meanwhile, UNEP and its pro-active Director Mostafa Tolba had no doubts about the future course of action on climate change. Flush with the success of negotiating the Vienna Convention on Ozone, he felt that the time was ripe to repeat the ozone 'miracle' for climate. Indeed, UNEP in its long range planning document of 1985 had called for a climate convention. In the wake of the 1985 Villach workshop, Tolba began active consultations for a possible convention with WMO and ICSU, UNEP's two long-standing collaborators on climate change. He also wrote to then US Secretary of State George Schultz urging the US to take appropriate actions (Hecht and Tirpak, 1995)." [Agrawala, 1998 (1), p. 609]

[450] A l'heure où nous achevons d'écrire cette thèse, à l'été 2014, le 'statu quo' demeure. Tous les regards semblent tournés vers Paris 2015 (COP21), où un traité international devrait enfin être signé par les Etats-Unis et le Canada (qui s'est retiré du Protocole de Kyoto en décembre 2011), et par les Grands émergents, devenus des émetteurs importants de GES. Ce texte, s'il est signé, devrait être contraignant en partie, mais principalement basé sur une approche "incitative" pour développer des technologies "propres". Il n'est toujours pas possible, à ce jour, d'avoir des certitudes au sujet du montant et de la répartition des fonds qui seront alloués par les Etats, ni sur les mécanismes et les métriques qui seront adoptées le cas échéant.

de faire émerger une « architecture post-Kyoto »[451]. La première approche consiste à parvenir à des réductions de GES sans suivre la voie tracée par Kyoto.[452] Trois voies principales se dégagent :

a) Les Etats non tenus par des objectifs de réductions de CO_2 (Etats-Unis, Grands émergents, pays en développement) promettent qu'ils vont arriver, petit à petit, à décarboner leur économie en empruntant et renforçant la voie, éminemment transversale, du « tunnel de l'énergie ». Comme le constataient Amy Dahan, Stefan Aykut, Hélène Guillemot et Agatha Korczak (Centre A. Koyré) de retour de la COP 14 de Poznan (décembre 2008), cette voie rime avant tout avec espoir d'une "croissance verte" par l'innovation, aux dépens d'autres approches « sur les modes de vie en tant que tels (transports, habitat, urbanisation), sur les modes de production, de consommation de biens et de développement à venir ». « Est-ce par respect de la souveraineté des Etats ? », se questionnaient les auteurs. En tout cas, « le tunnel de l'énergie a tendance à effacer la dimension proprement environnementale du changement climatique, au profit d'aspects principalement techniques. » En outre, « derrière le changement climatique se profile un nouvel ordre géopolitique où se conjuguent étroitement les préoccupations de sécurité énergétique et d'émissions de carbone », mais également de croissance verte par l'innovation technologique (énergies renouvelables, nucléaire, captation-

[451] *Cf.* e.g. Meidan, 2007, « La Chine dans une architecture post-Kyoto : réconcilier pressions internes et externes »

[452] Signé en 1997 et entré en vigueur en 2005 (et prolongé en 2012), le protocole de Kyoto pose les bases d'un marché international du carbone, à l'aide de trois mécanismes de flexibilité devant mener les pays signataires, des pays développés ou avec une économie en cours de transition (37 pays, listés dans l'Annexe I du traité), à atteindre leurs objectifs de réduction (définis dans l'Annexe B) :

- un mécanisme international d'échange entre les pays de l'annexe B. Des UQA (Unités de Quantités Attribuées) sont distribuées aux pays concernés en fonction de leurs objectifs de réduction d'émissions de GES fixé par le protocole. Les UQA sont vendables à d'autres Etats ;
- le MDP (Mécanisme de Développement Propre) octroie des crédits d'émission de GES, dits URCE (Unité de Réduction Certifiée d'Emissions), aux pays investissant dans des projets réduisant les émissions de GES dans des pays en voie de développement ;
- la MOC (Mise en Œuvre Conjointe) permet d'obtenir des crédits, dits URE (Unité de Réduction d'Emission), grâce à l'investissement dans des projets réalisés dans un autre pays de l'annexe B.

Le Protocole de Kyoto inclut par ailleurs dans sa comptabilité carbone certains puits de carbone – activités agricoles (utilisation des sols) et forestières (afforestation et reboisement). La création de tels puits peut se substituer à des réductions d'émissions de CO_2 (ce mécanisme a initialement été soutenu par les Etats-Unis lors des négociations au Protocole de Kyoto ; la quantification de la captation du carbone par ces puits naturels pose des problèmes épistémologiques importants [Lövbrand, 2004]). Deux articles du Protocole de Kyoto se réfèrent au secteur forestier dans les pays de l'Annexe I. L'Article 3.3 demande à ces pays de prendre en compte les variations des gaz à effet de serre découlant des « activités humaines, […] boisement, reboisement et déboisement depuis 1990 ». Au titre de l'Article 3.4, les effets d'activités additionnelles dans le secteur de l'utilisation des terres peuvent aussi être pris en compte dans la comptabilité nationale. Les Accords de Marrakech (2001) spécifient que les effets de la gestion des forêts antérieurs à 1990 peuvent être inclus, et définissent la gestion des forêts comme un « système de pratiques de gestion et d'usage de territoires forestiers destiné à remplir les fonctions écologiques (y compris la biodiversité), économiques et sociales de la forêt, d'une manière durable ». [Texte du Protocole de Kyoto en 2005 **in** *Joanneum Research*, 2005, *LULUCF workshop: Land-Use Related Choices under the Kyoto Protocol: Obligations, Options and Methodologies for Defining "Forest" and for Selecting Activities under Kyoto Protocol Article 3.4*. Graz, Autriche, 2-4 Mai 2005 ; http://www.fao.org/docrep/009/a0413f/a0413f09.htm (03/03/2014)]

séquestration du carbone (CCS, 'carbon capture & Storage'), *etc.*) [Dahan *et al.*, 2009, p. 44]… Ou, la quête du triptyque idéal "sécurité énergétique-baisse des émissions de CO_2-croissance verte", le tout peint sur un enduit de 'business as usual'.

b) Le Protocole de Kyoto met en place un marché du CO_2 qui vise à inciter les grandes installations des pays développés qui ont ratifié le traité à réduire leurs émissions, à la fois dans les pays développés (pour les activités qui ne sont pas délocalisées) et dans les pays en développement (pour les activités délocalisées). Des auteurs ont, par ailleurs, promu un autre type d'approche incitative. Les signataires du *Hartwell paper* proposent ainsi de décarboner l'économie en poursuivant des objectifs multiples « pour ce qu'ils sont », la décarbonisation ne se présentant plus comme un objectif absolu en soi, mais comme « un avantage connexe obtenu grâce à des mesures multiples » (dont le développement de sources d'énergie alternatives, financé en partie par une taxe carbone) [Prins *et al.*, 2010, pp. 5 & 25-34].[453]

c) Troisième voie de réduction des émissions de GES, sur laquelle insistent également les auteurs du *Hartwell paper* : une réduction des pollutions de l'air, soit générale, soit ciblée sur des pollutions affectant à la fois la qualité de l'air et le climat – c'est-à-dire des GES autres que les six types de gaz "réglementés" par les droits à polluer du Protocole de Kyoto (dioxyde de carbone (CO_2), méthane (CH_4), oxyde nitreux (N_2O), hexafluorure de soufre (SF_6), hydrofluorocarbures (HFC), et perfluorocarbures (PFC) et hydrocarbures perfluorés. La baisse des

[453] Au lendemain de la COP15 de Copenhague, la communication dite « de Hartwell » (*Hartwel paper. A New Direction for Climate Policy after the Crash of 2009*), dont Grundmann est l'un des quatorze signataires, suggéra de ne plus se focaliser sur les installations industrielles grosses émettrices de CO_2, mais de « décarboner l'économie en poursuivant des objectifs multiples pour ce qu'ils sont, la décarbonisation [ne se présentant plus] comme un objectif absolu en soi, mais comme un avantage connexe obtenu grâce à des mesures » multiples. Parmi elles, une « révolution des technologies d'énergie » – par le développement « bottom-up » (incitatif) de sources d'énergie alternatives, grâce à l'argent, reversée à l'innovation, d'une « taxe carbone augmentant graduellement mais initialement peu élevée (qui présente l'avantage d'enrayer les effets de croissance négative) ». L'objectif est de réduire au plus vite l'écart de prix entre l'énergie faiblement carbonée et non-carbonée, et l'énergie fossile. En outre, les auteurs appellent au développement accéléré de technologies d'adaptation au changement climatique.

L'autre voie principale, complémentaire, sur laquelle mettent l'accent les auteurs du *Hartwell Paper* est l'adaptation. Ils écrivent : « Il est important de faire évoluer les technologies, les institutions et les pratiques mobilisées pour gérer des coûts et dommages qui pourraient être évités, et plus encore de renforcer cette capacité d'adaptation alors que le climat et la société (et leurs risques associés) sont en train de changer. Ces initiatives et l'échange de bonnes pratiques en matière d'adaptation se justifient en dehors de tout discours sur la responsabilité humaine dans le changement climatique ou de la rapidité d'évolution des risques climatiques. L'adaptation et la décarbonisation doivent être deux dynamiques indissociables. »

Enfin, outre « Garantir l'accès à l'énergie pour tous » et « Garantir que les sociétés peuvent s'adapter au changement climatique », les auteurs de la publication énoncent un troisième « objectif fondamental » : « Garantir des environnements viables protégés des contraintes qui leur seraient préjudiciables ». Ceci comprend « l'élimination des émissions de carbone-suie » et « la réduction de l'ozone troposphérique » (voir notre Chapitre 9), mais également une « protection efficace des forêts tropicales ». [Prins *et al.*, 2010, pp. 5, 10-15 & 25-34]

taux d'ozone troposphérique et de carbone suie, en particulier, pourrait contribuer de manière significative à la lutte contre le CC [Prins *et al.*, 2010, pp. 10-14]. Cet aspect est plus important pour nous, car il mobilise les savoirs des chimistes de l'atmosphère. Nous discuterons la montée en puissance de cette thématique des "co-bénéfices entre pollution de l'air et CC" dans le Sous-chapitre 9.1.

L'autre approche complémentaire à Kyoto consiste à mettre l'accent sur les méthodes de lutte contre le CC autres que la mitigation :

a) l'adaptation, devenue inévitable, et ceci de manière imminente (la décennie 2000 a été marquée par la montée en puissance de cette thématique, même si elle était déjà un enjeu important de négociation auparavant) ;
b) la recherche en géoingénierie, qui a été discutée par plusieurs groupes d'experts environnementaux soutenus par l'ONU, au tournant des années 2010. A la fin du Sous-chapitre 8.2, nous discuterons les expertises autour d'une proposition de technologie géoingénierique particulière, l'injection d'aérosols soufrés dans la stratosphère.

8.2. Les substituts des CFC dans le Protocole de Kyoto et le changement climatique dans la gouvernance de l'ozone

Nous avons déjà mis en évidence différents héritages de la construction de la problématique de l'ozone dans la construction de la problématique du changement climatique : la forme d'expertise ; les institutions de gouvernance ; le cadrage (l'ODP décliné en GWP par Donald Wuebbles, le primat donné à la règlementation des grandes installations pollueuses). Nous avons en outre signalé le climat d'optimisme "environnementaliste" créé par la signature du Protocole de Montréal. Dans les Sous-chapitres 8.3 et 9.1, nous étudierons l'activité des chimistes de l'ozone, et plus généralement des chimistes de l'atmosphère, dans l'élaboration de l'expertise du GIEC, et dans la réflexion sur des moyens de réduire les émissions de GES dans une architecture post-Kyoto.

Auparavant, dans le présent Sous-chapitre, nous analysons trois types de couplages ozone stratosphérique-CC, en nous focalisant sur la communauté scientifique de l'ozone, et en particulier celle chargée de rédiger les *Ozone assessments* : (i) les substituts aux CFC sont des gaz à effet de serre puissants, qu'il faut réglementer comme tels ; (ii) les impacts du CC sur la réparation de la couche d'ozone (et, dans une moindre mesure, les effets des baisses

d'ozone stratosphérique sur le CC) sont devenus une thématique importante de la science de l'ozone ; (iii) une méthode de géoingénierie stratosphérique est discutée dans le 'Scientific Assessment of Ozone Depletion' de 2010.

Les substituts des gaz de Montréal : au-delà du co-bénéfice ozone-climat, de nouveaux gaz à effet de serre et de nouveaux risques environnementaux

Au cours des quarante années qui avaient précédé la signature du Protocole de Montréal, les émissions de substances destructrices d'ozone (ODS) avaient augmenté très rapidement. Le protocole a généré une réduction des émissions des ODS les plus dangereux : les chlorofluorocarbones (CFC) et le méthylchloroforme (CH_3CCl_3). Les taux de méthylchloroforme (CH_3CCl_3) ont depuis décliné rapidement, dans la mesure où ce composé a une durée de vie courte dans l'atmosphère. En revanche, les concentrations atmosphériques en CFC ont continué à augmenter pendant quelques années alors que les émissions de CFC décroissaient. Du fait de leur durée de vie importante dans l'atmosphère, les CFC continuaient à s'accumuler malgré des émissions en baisse. [*Ozone Depletion*, 2010, p. xiv]

Dès le premier 'Scientific Assessment of Ozone Depletion' (1989), deux principaux substituts aux CFC se dégagent. D'une part, les hydrofluorocarbures HFC. D'autre part, les hydrochlorofluorocarbunes HCFC. Mais, à la fin des années 1980, seuls ces derniers sont immédiatement disponibles pour la production industrielle. Or, à l'inverse des HFC, les HCFC ont un potentiel d'action destructrice sur l'ozone stratosphérique non nul. Ce potentiel de destruction d'ozone est, certes, bien moindre pour les HCFC que pour les CFC, dans la mesure où leur temps de résidence dans l'atmosphère est beaucoup plus faible, les HCFC étant détruits pour la plupart "rapidement" dans l'atmosphère (quelques années, contre plusieurs décennies voire plusieurs siècles pour les CFC), principalement lors de réactions chimiques dans la troposphère (voir Tableau 2 ci-dessous). Il n'en demeure pas moins que, sachant que les HCFC ne sont pas bénins pour la couche d'ozone, il est décidé, dès le départ, que leur utilisation serait une solution provisoire.

Species	1-D Model Results			2-D Model Results			
	LLNL	AER	Du Pont	Oslo	LLNL	AER	Du Pont
CFCII	80.	60.	71.	60.	52.	47.	46.
CFC12	154.	125.	154.	105.	101.	95.	118.
CFC113	96.	96.	117.	101.	79.		
CFC114	209.	260.	319.	236.	197.		
CFC115	680.	690.	548.	522.	393.	399.	
HCFC22	20.	20.0	16.	17.	15.	24.	12.7
HCFC123	1.9	2.1	1.6	1.7	1.5	2.4	1.2
HCFC124	8.4	8.8	6.9	7.4	6.5	10.	5.3
HFC125	37.	37.	25.	27.	43.	19.	
HFC134a	21.	21.	16.	15.	24.	12.5	
HCFC141b	8.9	9.4	7.8	8.0	6.9	11.	5.8
HCFC142b	25.	25.	19.	21.0	19.	28.	15.1
HFC143a	54.	52.	42.	40.			
HFC152a	2.1	2.3	1.7	1.5	2.7	1.3	
CCl_4	73.	53.	61.	52.2	47.	40.	40.
CH_3CCl_3	7.4	7.4	6.0	6.3	5.8	7.9	4.7

(a)

Species	ODPs		GWP
	1-D Models	2-D Models	1-D Models
CFC-11	1.0	1.0	1.0
CFC-12	0.9–1.0	0.9	2.8–3.4
CFC-113	0.8–0.9	0.8–0.9	1.3–1.4
CFC-114	0.6–0.8	0.6–0.8	3.7–4.1
CFC-115	0.4–0.5	0.3–0.4	7.4–7.6
HCFC-22	0.04–0.05	0.04–0.06	0.32–0.37
HCFC-123	0.013–0.016	0.013–0.022	0.017–0.020
HCFC-124	0.016–0.018	0.018–0.024	0.092–0.10
HFC-125	0	0	0.51–0.65
HFC-134a	0	0	0.24–0.29
HCFC-141b	0.07–0.08	0.09–0.11	0.084–0.097
HCFC-142b	0.05–0.06	0.05–0.06	0.34–0.39
HFC-143a	0	0	0.72–0.76
HFC-152a	0	0	0.026–0.033
CCl_4	1.0–1.2	1.0–1.2	0.34–0.35
CH_3CCl_3	0.10–0.12	0.13–0.16	0.022–0.026

(b)

Tableau 2 : (a) Temps de vie atmosphérique d'ODS et de leurs substituts, calculé à l'aide de plusieurs modèles numériques, et (b) leurs ODP et GWP, recensés par le premier 'Ozone Assessment'

(à l'époque, les GWP sont des « HGWP », des GWP relatifs au CFC-11, pris comme référence, et non relatifs au CO_2, comme les GWP des rapports suivants)

[*Ozone Assessment*, 1989, « Table 3 », p. 313 & « Table 1 », p. xiii]

Lors d'une seconde phase, les principaux substituts aux HCFC seront les HFC. Les HFC ne détruisent pas la couche d'ozone. Par contre, ce sont des gaz à effet de serre puissants. Leur GWP est même plus important que celui des HCFC (voir Tableau 2(b) ci-dessus). Si les experts des 'Scientific Assessments of Ozone Depletion' ont, dès leur premier rapport, insisté sur la nécessité de trouver des substituts aux CFC qui auraient à la fois des ODP mais aussi des GWP plus faibles que les CFC (ce qui est le cas des HCFC comme des HFC), le choix fut fait de donner le primat au rétablissement de la couche d'ozone. On prit en effet le parti de privilégier à moyen terme le développement des HFC, à l'ODP nul et au GWP très important, sur le développement des HCFC, à l'ODP faible mais non nul et au GWP plus faible. [*Ozone Assessment*, 1989]

Les HFC se retrouvèrent alors dans la gouvernance climatique. Trois substituts aux ODS sont en réglementés par le Protocole de Kyoto :

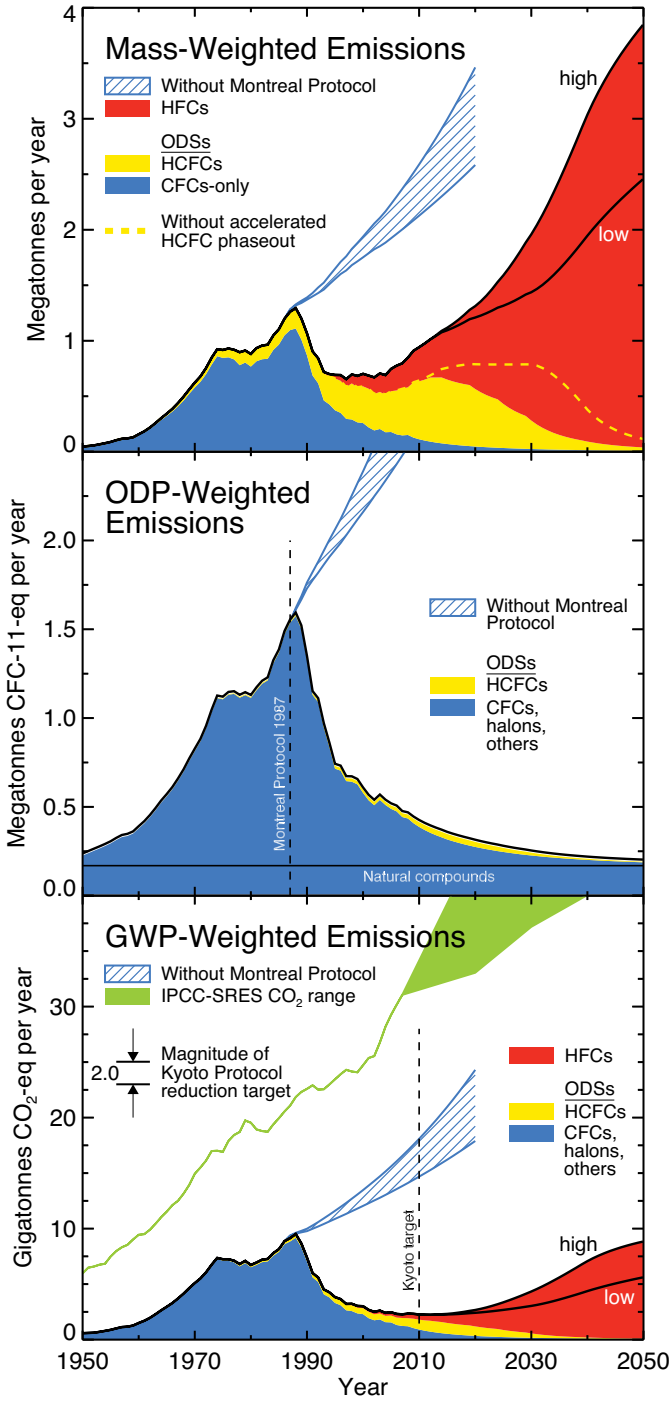
(i) les hydrofluorocarbures (HFC), donc, qui sont des gaz à longue durée de vie, que l'on retrouve dans de nombreux produits industriels (réfrigérants, extincteurs, bombes aérosols, agents de gonflement de certaines mousses isolantes) ;

(ii) l'hexafluorure de soufre (SF_6), utilisé dans le secteur électronique, dans la métallurgie pour produire du magnésium et de l'aluminium, ou encore comme gaz détecteur de fuites ;

(iii) les perfluorocarbures (PFC), que l'on utilise notamment dans les climatiseurs, réfrigérateurs et extincteurs, et plus récemment largement dans le secteur de l'électronique.

Les experts du 'Scientific Assessment of Ozone Depletion' de 2010 estiment que, sur la période 2003-2008, l'action radiative directe de ces trois types de substances fluorées

combinés a été importante, « comparable » au forçage radiatif direct du CH_4 ou du N_2O. Et, les émissions mondiales de HFC sont amenées à augmenter très fortement au cours des décennies à venir, générant un effet de serre important, comme le montrent les résultats des simulations reproduites par les experts du dernier 'Assessment of Ozone Depletion' (voir Figure 37 (a&c) ci-dessous). A l'inverse des HCFC, qui ne résident pas longtemps dans l'atmosphère, les HFC ont « typiquement » des durées de vie atmosphériques comparables et des GWP « comparables » aux CFC, même si les prévisions indiquent que, si l'on atteint en 2050 des émissions de HFC trois fois supérieures aux émissions de CFC de 1987, le forçage radiatif sera à peu près équivalent dans les deux cas. [*Ozone Assessment*, 2011, p. 1.82 & xvi, 5.8, Appendix 5A & ES.3]



(a)

(b)

(c)

Figure 37 : Entre 1950 et 2050, (a) masse (en mégatonnes par an) des émissions globales d'ODS et de leurs substituts (les HCFC) ; (b) potentiel de destruction d'ozone relatif (en mégatonnes de CFC-11-équivalent par an) ; (c) potentiel de réchauffement climatique relatif (en gigatonnes de CO_2-équivalent par an)

[*WMO*/…, 2011, « Figure ES-1 », p. ES.3]

Plusieurs lectures des Figures 37 (a&c) sont possibles. Une interprétation optimiste retiendra que « le Protocole de Montréal a, à la fois protégé la couche d'ozone, et produit de substantiels co-bénéfices en réduisant le changement climatique », comme l'affirment les auteurs du dernier *Ozone Assessment*, et comme l'indique à première vue la Figure 37(c) [*Ozone Assessment*, 2011, p. ES.7]. Certes, dès les années 1990, une stratégie d'élimination accélérée des HCFC a été promue, non seulement au nom de la lutte contre la destruction de la couche d'ozone mais aussi contre le changement climatique. Certes, le bilan climatique général de la substitution des CFC par les HCFC et les HFC pourrait être positif à l'horizon 2050, par rapport à 1987. Toutefois, d'après les simulations de la Figure 37(c), à cet horizon 2050, les résultats climatiques ne sont pas spectaculaires. La fourchette haute des simulations ramène même aux niveaux de l'année 1987. Si l'on veut voir le verre à moitié vide, on peut juger que, *d'un point de vue climatique*, les HFC ont simplement remplacé les CFC, et que la réglementation aura uniquement bénéficié à la couche d'ozone, et pas au climat.

La gouvernance couplée ozone-climat s'est heurtée à plusieurs écueils. D'abord, les Protocoles de Montréal et Kyoto ne contraignent pas les pays en développement. En effet, ces derniers ne sauraient, dans la logique onusienne, être contraints à des réductions d'émissions. Or, les émissions de HCFC, et plus encore celles des HFC, sont aujourd'hui en hausse dans certains pays tropicaux aux besoins croissants en réfrigération et climatisation, en particulier en Asie de l'est. De l'aveu des experts de l'*Ozone Assessment 2010*, « l'abondance [mondiale] en HCFC a augmenté plus vite que prévu, alors que, dans le même temps, les concentrations en CFC ont décru plus lentement que prévu » [*Ozone Assessment*, 2011, pp. ES 1&2 & 1.82-1.83].

Ensuite, le fait que le Protocole de Montréal ait "refilé le bébé HFC" au Protocole de Kyoto n'a pas facilité les réglementations. En effet, l'application du Protocole de Kyoto ne s'arrête pas uniquement aux portes des pays en développement, mais également des Etats-Unis. Il faut, dès lors, trouver d'autres media, tels que le G-20. Le 6 Septembre 2013, le Secrétaire à la communication de la Maison blanche a annoncé que le Président Obama venait de parvenir à un accord bilatéral avec la Chine sur les HFC, ainsi qu'à un accord avec l'ensemble des pays du G-20. Leurs dirigeants avaient exprimé « leur soutien à des initiatives complémentaires aux efforts faits dans le cadre de l'UNFCCC, dont l'utilisation de l'expertise et des institutions du Protocole de Montréal, pour stopper la production et la consommation de HFC (tout en maintenant les HFC dans le périmètre de l'UNFCCC et son Protocole de Kyoto, en ce qui concernait la comptabilité et les rapports de synthèse sur les émissions). » [*US EPA*, 2013]

Enfin, les substituts sont de nouvelles technologies émises dans des proportions équivalentes aux produits qu'ils remplacent (et même en quantité supérieure, si le secteur est en croissance). Ils constituent de nouveaux risques environnementaux, qu'il faut étudier. Le premier 'Assessment of Ozone Depletion' mettait notamment en garde contre « la possible contribution » des « halocarbones alternatifs », HCFC et HCF, « comme précurseurs dans la formation d'ozone et d'autres oxydants [troposphériques] à l'échelle des villes et à l'échelle globale ». Le rapport le plus récent évalue « les impacts environnementaux » des substituts en usage ou en cours de développement, qu'il quantifie notamment à l'aide de deux « métriques » : le Potentiel de création d'ozone photochimique (POCP, 'Photochemical Ozone Creation Potential') ; leur contribution dans la formation de l'acide trifluororacétique (TFA, 'trifluoroacetic acid') [*Ozone Assessment*, 1989, p. 405 ; *Ozone Assessment*, 2011, pp. 1.55-1.62]… Autre problème : les risques environnementaux sont parfois découverts très tardivement, après que la substance s'est déjà imposée sur un marché à grande échelle… N'est-ce pas précisément ce qui s'est produit avec le CFC ? Quelques mois après le dépôt du premier brevet reçu pour leur développement d'un CFC, le 31 décembre 1928, ses inventeurs, trois chimistes des Laboratoires *Frigidaire* (détenus par *General Motors*), Thomas Midgley, Albert Henne et Robert McNary, ne présentaient-ils pas leur CFC comme une alternative sans défaut aux autres réfrigérants (*cf.* le Tableau 3 ci-dessous) ? [Christie, 2000, pp. 18-20 & 175-176]

Refrigerant	Stability	Volatility	Toxicity	Flammability
air	OK	cannot condense	OK	OK
carbon dioxide	OK	too high	OK	OK
water	OK	too low	OK	OK
ammonia	OK	OK	toxic, but gives warning	slightly flammable
sulfur dioxide	corrosive if wet	OK	toxic, but gives warning	OK
methyl chloride	OK	OK	toxic, no warning	flammable
methyl bromide	OK	low	toxic, no warning	flammable
butane	OK	OK	OK	highly flammable
CFCs	OK	OK	OK	OK

Tableau 3 : Les propriétés de neuf réfrigérants, dont le CFC, d'après ses inventeurs, en 1930 [Midgeley & Henne, 1930 **in** Christie, 2000, p. 176, « adapté de la Table 1 de Midgeley & Henne, 1930, *Ind. & Eng. Chem.*, 22, p. 542 »]

Nous connaissons la suite : l'explosion de la consommation de CFC, en particulier dans les années 1950-60. Au-delà de cette remarque "faible", car simplement analogique, sur le développement technologique, il faut souligner que des environnementalistes n'ont cessé de répéter que nous pouvions fort bien nous passer de la plupart des produits contenant des

ODS. Dès 1973, avant même que ne soit formulée l'hypothèse de Molina-Rowland en 1974 – et donc sans lien avec la question de l'ozone –, l'ONG *Friends of the Earth*, constatant que l'usage des bombes aérosols se généralisait, avait questionné leur utilité. En 1975, Barbara Hogan, de l'ONG *American Center for Science in the Public Interest* lui emboîtait le pas. Elle déclarait à un reporter de *Business Week* : « Les aérosols sont la forme ultime de suremballage. Avec tous les problèmes [environnementaux] que nous avons [déjà], nous avons du mal à comprendre la logique d'utiliser de tels aérosols. Il s'agit d'un produit inutile. » [*New Scientist*, 1975, pp. 17-18]

Retenons, par ailleurs, de cette section, que nous venons de rencontrer de premiers cas de recherche de "co-bénéfice" et de "non-contradiction" entre la gouvernance climatique et d'autres gouvernances (ozone, pollution troposphérique). Ou comment la compartimentation des politiques environnementales, la plupart du temps inévitable, conduit à des "dilemmes" (nous développerons ce point avec un autre exemple, dans le Sous-chapitre 9.1).

Le changement climatique comme thématique ascendante dans les rapports d'experts internationaux sur l'ozone stratosphérique

Un couplage croissant des aspects ozone stratosphérique et changement climatique s'observe dans la littérature sur l'ozone dans les années 1990-2000. Cette tendance est manifeste lorsqu'on parcourt chronologiquement les sept *Ozone Assessments* du 'Scientific Assessment Panel' (SAP) publiés successivement en 1989, 1991, 1994, 1998, 2002, 2006 et 2010. Nous ne détaillerons pas ici les évolutions des discours scientifiques sur les rétroactions ozone stratosphérique-changement climatique. Nous nous contenterons de donner quelques exemples du haut niveau d'intrication entre les deux problématiques que l'on retrouve dans le dernier 'Scientific Assessment of Ozone Depletion' (de 2010).

Outre rappeler que les ODS et la plupart de leurs substituts sont des GES puissants (aspect que nous avons détaillé dans la Section précédente), les experts de l''Assessment of Ozone Depletion' de 2010 distinguent deux autres dimensions de la problématique couplée ozone-climat :

(i) « Puisque la couche d'ozone est une partie intégrante du système Terre », écrivent-ils, il faut interroger « l'influence du changement climatique sur la couche d'ozone stratosphérique et son développement futur ; en particulier comment le refroidissement de la stratosphère dû au dioxyde de carbone anthropique augmente, et comment le réchauffement de la troposphère due à l'augmentation de l'abondance des gaz à effet de serre influence la couche

d'ozone stratosphérique ». En d'autres termes, il faut chercher à « démêler les influences du changement climatique sur les niveaux d'ozone stratosphérique des influences des substances destructrices d'ozone (ODS) » ;

(ii) Ensuite, quels effets les changements en ozone stratosphérique ont-ils sur le climat stratosphérique, et sur le climat global ? Et, « comment les baisses de concentrations d'ODS vont-elles impacter le climat ? » [*WMO/…*, 2011, p. xiv]

La Figure 38 ci-dessous offre « une représentation schématique des interactions chimie stratosphérique-climat », proposée par les auteurs de l'*Ozone Assessment 2010* :

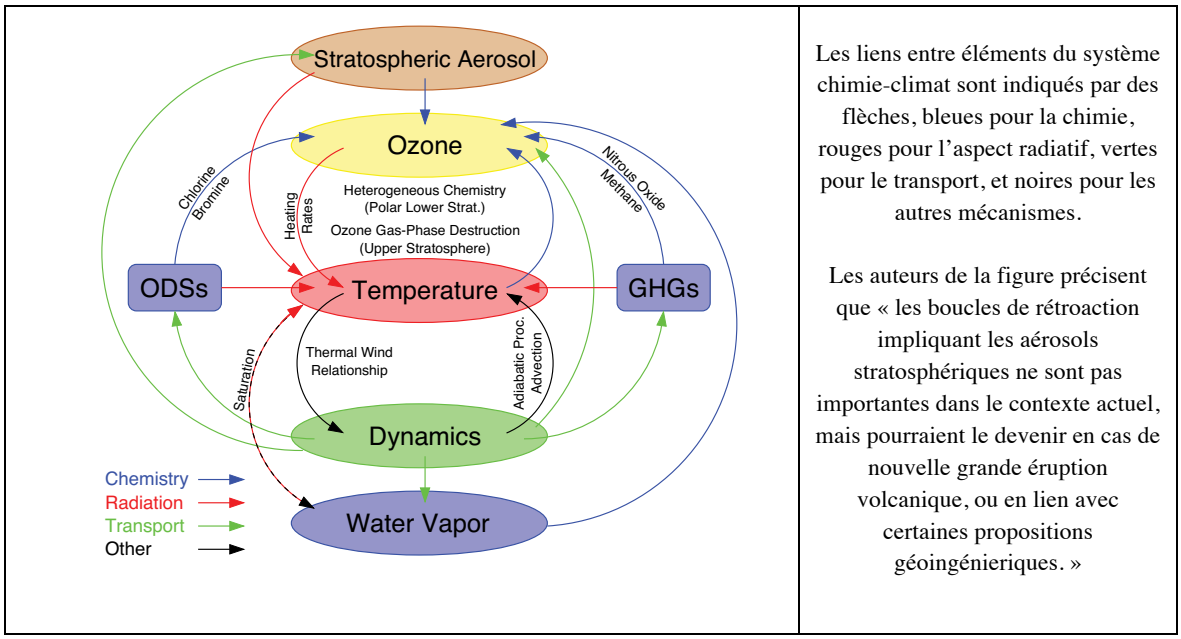


Figure 38 : Interactions multiples entre problématique de l'ozone et changement climatique, d'après l'*Ozone Assessment* de 2010
[*WMO/…*, 2011, « Figure 3.22 », p. 3.49]

Les interactions multiples entre les composantes du système chimie-climat de la Figure 38 ci-dessus, expliquent ses auteurs, « compliquent l'attribution propre des changements de l'ozone aux changements en ODS, et à d'autres facteurs requis par la définition du plein rétablissement ('full recovery') de l'ozone employée dans ce rapport ». En outre, admettent les experts, plusieurs phénomènes demeurent très imparfaitement intégrés aux modèles : les processus sur les potentiels changements de l'oscillation quasi-biennale des vents dans la stratosphère équatoriale ; certaines rétroactions du système océan-climat-stratosphère (par exemple, les changements d'émissions de halocarbones par la biologie marine, du fait des changements du climat et des UV de surface) et du système biosphère terrestre-climat-stratosphère (par exemple, les émissions de précurseurs d'ozone troposhérique). Toutefois, se réjouissent-ils, « les résultats des modèles indiquent que les changements en ODS et en GES semblent affecter l'ozone de manière presque indépendante. » De plus, « les moteurs primaires des changements d'ozone, ainsi que leurs interactions, ont été largement décrits

dans les CCM ('Climate-Chemistry Models ; voir notre Sous-chapitre 8.3) qui ont été utilisés pour réaliser les projections pour l'ozone et les flux d'UV ». [*Ozone Assessment*, 2011, pp. 3.48-3.49]

Nous ne rentrerons bien sûr pas dans le détail technique des interactions ozone-climat qu'exposent les auteurs du rapport de 2010. Signalons simplement que le sous-programme en cours dit « SPARC-CCMVal » (SPARC-'Chemistry-Climate Model Validation Activity') du 'World Climate Research Programme' (WCRP), qui porte sur les modèles couplés chimie-climat (CCM) a été le lieu de travaux importants sur cette interface ozone-climat.

Nous conclurons ce Sous-chapitre en expliquant la présence, dans le 'Scientific Assessment of Ozone Depletion' de 2010, de deux paragraphes consacrés à une technique de géoingénierie pour contrebalancer le changement climatique, l'injection de particules soufrées dans la stratosphère.

Une méthode de géoingénierie stratosphérique discutée dans le 'Scientific Assessment of Ozone Depletion' de 2010

Dans deux endroits du 'Scientific Assessment of Ozone Depletion', les auteurs délivrent de brèves et semblables expertises sur les risques d'impact sur la stratosphère d'une hypothétique injection future d'aérosols soufrés visant à contrebalancer le réchauffement climatique ("3.2.6. Geoengineering by sulfate aerosol injection" ; "5.4.2.4 Geoengineering: enhancing earth's albedo by stratospheric injection of sulfur"). Leurs « investigations CCM, écrivent-ils, confirment les résultats empiriques de Tilmes *et al.* (2008), qui montrent qu'une injection de sulfates dans la stratosphère pourrait accroître la destruction d'ozone à la fois en Arctique et en Antarctique », d'autant plus si elle se fait dans les décennies qui viennent, au cours desquelles « les niveaux d'halogènes demeureront élevés ». Les auteurs insistent, en outre, sur le fait que d'autres risques environnementaux pourraient émerger de nouvelles modélisations. « Nous avertissons que les projections d'ozone [effectuées jusqu'alors] sont basées sur des scénarios simples, des conditions idéalisées, et seulement d'après deux CCM, dont un ne prenait pas en compte la microphysique des aérosols ». [*WMO/…*, 2011, pp. 3.13-3.15 & 3.23-3.24] Dans le « résumé exécutif » (pour les décideurs politiques), les experts écrivent :

> « Les importantes injections délibérées de composés soufrés dans la stratosphère, qui ont été suggérées comme une approche d'intervention climatique (géoingénierie), altéreraient l'état radiatif, dynamique et chimique de la stratosphère, et on peut s'attendre à ce qu'elles aient des effets inattendus substantiels sur les niveaux d'ozone stratosphériques. » [*WMO/...*, 2011, p. ES.7]

Aussi critique soit-elle, et aussi marginale soit-elle au sein du rapport, la présence d'une discussion sur la géoingénierie dans le 'Scientific Assessment of Ozone Depletion' de 2010 est une première, et donc un événement marquant. Elle a de quoi surprendre, à première vue, d'autant qu'elle bénéficie d'une place au sein du « résumé exécutif », la partie du rapport la plus lue et la plus citée. Deux facteurs expliquent cette nouveauté.

Premier facteur : un contexte général de 'mainstreaming' de la géoingénierie à la fin des années 2000. Dans les années 1990, l'immense majorité des climatologues regardait la géoingénierie comme une science-fiction, émanant de quelques nostalgiques de la Guerre froide. Lorsque les chercheurs reconnus Ralph Cicerone, Scott Elliott et Richard Turco proposèrent en 1991 de réfléchir à la possibilité d'une géoingénierie de la couche d'ozone – une injection 'in situ' d'hydrocarbones, qui pourrait « réduire la destruction de la couche d'ozone » –, les 'Scientific Assessment of Ozone Depletion' de 1991 et 1994 n'emboitèrent pas le pas [Cicerone *et al.*, 1991 ; *WMO/…*, 1992 & 1995]. Pas plus qu'ils ne font mention, et pas plus que les auteurs des 'Scientific Assessment of Ozone Depletion' suivants de 1998, 2002 et 2006 ne font mention des risques inhérents à une éventuelle injection d'aérosols soufrés dans la stratosphère pour contrebalancer le changement climatique, alors que la proposition avait déjà été formulée quelques années auparavant [MacCracken, 1991 ; *US NAS*, 1992 ; *WMO/…*, 1998, 2002 & 2006]. Et, jusqu'au début des années 2000, seul un petit nombre de scientifiques envisage de mettre la géoingénierie sur la liste des options de lutte contre le changement climatique et ses effets, aux côtés des baisses d'émissions de CO_2 et de l'adaptation. A la fin de la décennie 2000, en revanche, la géoingénierie climatique est devenue un sujet sérieux, légitime de discussion au sein de la communauté scientifique internationale. En 2011, le GIEC organise à Lima une rencontre sur le sujet, dont est tiré un rapport spécial [*IPCC*, 2012].[454]

Il existe un second facteur expliquant la prise de parole des experts de l'ozone sur la géoingénierie stratosphérique : un facteur lié à leur communauté scientifique particulière. Si les impacts de la géoingénierie peuvent, selon la technologie particulière concernée, réclamer l'expertise de climatologues, de météorologistes, d'océanographes, de géologues, de micro- et « macro »-biologistes, la mesure des effets environnementaux d'une injection d'aérosols soufrés incombe principalement aux chimistes de l'ozone stratosphérique. Toutefois, posséder une compétence sur un sujet n'implique pas d'en faire usage. Il faut, pour cela, que la communauté scientifique l'ait jugé digne d'intérêt pour intégrer un cadre précis d'énonciation (ici, un rapport d'expert international sur la couche d'ozone).

[454] Sur les raisons de la montée en puissance de la géoingénierie à la fin des années 2000, nous renvoyons à Hamilton, 2013. Pour un état de l'art de la littérature en SHS sur le sujet, nous renvoyons à Briday, 2014.

Or, en 2006, un événement a éveillé la communauté des chimistes de l'atmosphère à la géoingénierie : un volume de la revue scientifique *Climatic Change*,[455] en partie consacré à la géoingénierie, présnente des articles appelant à renforcer l'effort de recherche scientifique sur le sujet (uniquement par le biais de modélisations numériques, pour le moment). Ils sont signés de la main de deux des chimistes de l'atmosphère les plus influents. Le premier est Ralph Cicerone, le Président de l'Académie des sciences des Etats-Unis, dont la réputation scientifique est assise sur ses travaux des années 1970 sur la destruction de l'ozone stratosphérique. Le second est le Prix Nobel Paul Crutzen [Cicerone, 2006 ; Crutzen, 2006]. Dans les années qui suivent 2006, Cicerone et Crutzen réitèrent leur appel du pied pour promouvoir la recherche sur la géoingénierie.

En outre, dans le même numéro de *Climatic Change*, un troisième article répond aux textes de Cicerone et Crutzen, rédigé par leur pair Mark Lawrence (du 'Max-Planck-Institut für Chemie', Allemagne). Le chimiste de l'atmosphère y énonce « le dilemme » que pose à présent avec acuité la géoingénierie à la communauté scientifique : faut-il, ou non, « en parler » ? Il répond par l'affirmative, expliquant que, puisque l'« on discute à présent intensément au sujet de la géoingénierie, en tout cas en dehors de la littérature scientifique formelle, et que ceci ne s'en ira pas en l'ignorant ou en refusant d'en parler scientifiquement […], [sa] responsabilité de scientifique est de faire ce que les scientifiques font le mieux : explorer la géoingénierie, la comprendre en profondeur, et, pour finir, décrire les points-clefs de cette compréhension en termes accessibles à un public éduqué et aux communautés de décideurs politiques, afin d'aider à la prise de décisions bien informée sur la géoingénierie dans le futur ». [Lawrence, 2006, pp. 245-247]

La justification a de quoi surprendre. Certes, en 2006, la presse de vulgarisation scientifique a déjà commencé à s'emparer de cette "nouvelle solution miraculeuse" au dérangeant problème environnemental que pose la croissance mondiale de l'économie carbonée. Mais, en 2006, les médias ont, à ce stade, peu communiqué sur la géoingénierie, la

[455] La revue *Climatic Change* a été fondée en 1977 par Stephen Schneider (1945-2010). Devenu une figure incontournable de la science du changement climatique, le climatologue états-unien discutera la géoingénierie dans une dizaine d'articles, au cours des décennies 1990-2000, dont, à plusieurs reprises, dans *Climatic Change*. Schneider s'est toujours montré très peu enthousiaste à l'idée que l'homme se livre un jour à un déploiement de technologies géoingénieriques. Toutefois, il n'excluait pas cette option « en dernier recours » ; et écrivait, dès 1996, que « l'étude du potentiel de la géoingénierie était probablement nécessaire, étant donné notre impact involontaire croissant sur la planète, et la possibilité que d'autres alternatives soient pires » [Schneider, 2008, "Geoengineering: could we or should we make it work?", *Phil. Trans. R. Soc. A*, 366, p. 3859 ; Schneider, 1996, "Geoengineering : Could – or should – we do it?", *Climatic Change*, pp. 300-301]. Dès 1974, Schneider avait signé une communication dans *Science*, intitulée « La stabilisation du climat : pour le meilleur ou pour le pire ? » ("Climate Stabilization: For Better or Worse?"), avec l'éminent météorologiste William Kellogg (1917-2007). A l'époque, l'idée de contrebalancer le changement climatique d'origine anthropique à l'aide des sciences de l'ingénieur est une thématique nouvelle. Dans leur article, Schneider et Kellogg montrent leur scepticisme à son sujet, comme ils le font concernant les autres types de « stabilisation du climat » qu'ils abordent (notamment celles dans la lignée des technologies discutées par Wexler, que nous avons rencontrées dans le Chapitre 2). [Kellogg & Schneider, 1974]

thématique demeurant presque inconnue du grand public (en tout cas, en Europe)… M. Lawrence n'aurait-il pas plutôt dû questionner le rôle de la poignée de scientifiques qui avait maintenu en vie la thématique de la géoingénierie dans le climat peu propice des années 1990, où l'heure était pourtant aux discours de bonnes intentions pour réduire les émissions de CO_2 ? En outre, ne faudrait-il pas, pour commencer, interroger le frémissement de la thématique géoingénierique dans la littérature scientifique et experte de la fin des années 2000, à l'aune des prédictions climatiques plus alarmistes formulées alors, et de la situation périlleuse dans laquelle se trouvait la gouvernance climatique ?[456]

Quoiqu'il en soit, les experts de l''Assessment of Ozone Depletion' de 2010 justifient explicitement leur prise de parole au sujet de la géoingénierie par la discussion qui a émergé autour de la publication de Paul Crutzen en 2006. Ils écrivent :

> « Les doutes concernant l'efficacité des actuels accords internationaux pour restreindre les émissions de GES dans l'atmosphère pour mitiger le changement climatique ont conduit à un débat au sujet de la possibilité de modifier intentionnellement le climat à travers des actions de géoingénierie à grande échelle ; voir Crutzen, 2006, et une série de réponses dans [le même] numéro spécial de *Climatic Change* (vol. 77, no. 3-4, 2006). » [*WMO/...*, 2011, p. 3.13]

Or, rappelons que Crutzen est celui qui, en 2000, nous annonçant en compagnie d'Eugene Stoermer que nous nous trouvions, sans le savoir, dans l'Anthropocène, c'est-à-dire dans une nouvelle époque géologique (en cours) dans laquelle l'humanité serait devenue une force géologique de premier plan, si ce n'est la force hégémonique, écrivait :

> « Une tâche stimulante, mais aussi difficile et intimidante, attend la recherche sur le global et la communauté des ingénieurs, pour guider l'humanité vers un 'management' global et durable de l'environnement. » [Crutzen & Stoermer, 2000, p. 18]

Une profession de foi en faveur d'une sortie de la crise environnementale par la technocratie et le progrès technique, en somme.

Mais, d'autres sources de l''Assessment of Ozone Depletion' de 2010 sont plus "compromettantes" encore que la référence au scientiste Paul Crutzen. Le rapport cite un article signé, entre autres, de la main d'Edward Teller (1908-2003) en personne (Teller *et al.*, 1997). Teller n'est pas seulement un physicien influent, qui a fait ses armes dans le sérail scientifique du complexe universitaire-militaire-industriel états-unien des décennies 1950-60. Teller n'est pas seulement le Père de la Bombe H, élu directeur émérite d'un des laboratoires phares de la recherche militaire, le 'Lawrence Livermore National Laboratory' (LLNL), en

[456] M. Lawrence est aujourd'hui le Directeur scientifique du groupe 'Sustainable Interactions with the Atmosphere (SIWA) de l''Institute for Advanced Sustainability Studies' (IASS) de Potsdam, un groupe transdisciplinaire d'étude sur l'ingénierie du climat. Le principal pôle de recherche transdisciplinaire européen sur la géoingénierie s'est développé à Oxford, au Royaume-Uni. Lancé en 2010, il s'intitule l''Oxford Geoengineering Programme'.

1975. A partir des années 1980, il a adopté, au sujet l'hiver nucléaire et du réchauffement climatique, « une attitude 'wait and see', en mettant l'accent sur les incertitudes, en incitant à plus de recherche, et en plaçant son espoir dans les solutions technologiques futures auxquelles donnerait accès la recherche fondamentale », comme l'a résumé Matthias Dörries. Teller n'a jamais été alarmiste au sujet des répercussions du changement climatique [Dörries, 2011, p. 221 ; Fleming, 2010, pp. 170-216 ; Hamilton, 2013, pp. 173-174 ; Teller *et al.*, 1997].

Parallèlement, E. Teller a été l'un des chercheurs qui a montré le plus d'enthousiasme pour la modification du temps et du climat (et ceci, dans son cas, de manière continue depuis le sortir de la Seconde guerre mondiale). En 1968, c'est sous la direction de Teller que Michael MacCracken (1942-…) a soutenu sa thèse sur les modélisations numériques des âges glaciaires (PhD 'Applied Science' ; Université California Davis/LLNL). Puis, MacCracken et ses collègues du LLNL (dont Ken Caldeira, en particulier) ont été, au cours des années 1980 et 1990, les plus actifs pourvoyeurs d'expertise sur les futurs géoingénieriques possibles. On ne s'étonne donc guère de retrouver, à la fin des années 1990, MacCracken, Caldeira et leur Pygmalion Edward Teller, dissertant ensemble des usages possibles d'un éventail de particules d'aluminium réfléchissantes pour contrebalancer le changement climatique sans endommager la couche d'ozone (proposition que l'on trouve exposée pour la première fois dans l'article Teller *et al.*, 1997).

Comment les auteurs de l''Assessment' utilisent-ils spécifiquement les travaux de Teller et ses collègues ? Premièrement, ils soulignent que « peu d'études ont été menées à ce jour au sujet d'une technologie ingénierique de type couche réflective stratosphérique qui utiliserait des matériaux autres que le sulfate (e.g. des particules fabriquées pour obtenir une dispersion maximale des radiations de faible longueur d'onde, et avec des temps de vie stratosphériques plus longs, telles que proposées par Teller *et al.*, 1997) » [*WMO/…*, 2011, p. 5.24]. Les experts de l'ozone indiquent, par ce biais, que les impacts environnementaux de ce type de technologie n'ont toujours pas fait, en 2010, l'objet d'études sérieuses. On peut alors sérieusement questionner la pertinence d'en parler dans un tel rapport.[457]

---

[457] En outre, une telle ignorance au sujet des impacts environnementaux, en 2010, ne fait que corroborer nos soupçons au sujet de la partialité des arguments de la section plutôt enthousiaste sur la géoingénierie, et en particulier sur la proposition de Teller (et des modélisations de Ken Caldeira et ses collègues du LLNL, dans sa lignée, qui cherchèrent à démontrer la crédibilité des technologies d'injection d'aérosols dans la stratosphère), présente dans le rapport du Groupe III du GIEC de 2001 (soit, neuf ans plus tôt, donc lorsqu'un nombre encore plus insignifiant de travaux avaient été proposés sur les risques environnementaux liés à cette technologie d'injection alternative aux aérosols soufrés). [Schneider, 2001 ; *IPCC (WG I)*, 2001, *op. cit.*, pp. 334 & 301 ; Briday, 2014]

A quoi notre méfiance tient-elle ? Au fait que la personne tenant la plume n'était autre que David Keith. Cet ancien du MIT a alimenté la littérature sur la géoingénierie et promu l'entrée de la géoingénierie dans les rapports du GIEC depuis le début des années 1990, puis il est devenu le géoingénieur le plus médiatique dans les années 2000. Dans le rapport du GIEC, Keith et ses relecteurs déclaraient :

> « Teller et ses collègues « ont montré que la masse [d'aérosols] requise pour un système basé sur des particules d'aluminium serait semblable à celle d'un système basé sur des aérosols d'acide sulfurique, mais avec un impact environnemental différent. »

Deuxièmement, quelques lignes plus haut, les auteurs de l''Assessment' de 2010, se sont directement référés aux travaux de Teller et ses collègues. Pour souligner quel aspect de la question ? Le coût du projet. Ils écrivent :

> « On a estimé que l'injection de particules conçues pour une dispersion optimale de radiations dans les courtes longueurs d'onde (e.g. les sulfates ou l'oxyde d'aluminium) pourrait être viable économiquement et qu'il est probable qu'elle soit la méthode la plus rentable au sein de la classe des options de géoingénierie nommée "solar radiation management" (Teller et al., 1997 ; Lenton & Vaughan, 2009 ; *Royal Society*, 2009). » [*WMO/...*, 2011, p. 5.23]

Au-delà de la véracité de l'assertion qui voudrait que l'injection des "particules de Teller" soient « viables économiquement », mise en doute par plusieurs auteurs – y compris par les

---

Les auteurs ne nous en disent pas plus sur la nature de cet impact environnemental. Ils poursuivent :

> « De plus, Teller *et al.*, 1997 démontre que l'usage de "disperseurs" métalliques ou optiques peuvent, en principe, grandement réduire la masse totale de particules requises. […] Enfin, Teller *et al.*, 1997 montre que les systèmes fabriqués en aluminium peuvent être conçus pour avoir des durées de vie stratosphériques importantes tout en s'oxydant la troposphère, et ce qui garantit que peu de particules ne soient déposées en surface. »

Les vertus de la technologie énumérées par Teller ne s'arrêtent pas là. Les auteurs du GIEC trouvent bon de reproduire la liste de manière exhaustive, à l'aide de formules pour le moins complaisantes à son sujet (et pour le moins confuses). Nous reproduisons le paragraphe conclusif à leur section discutant la géoingénierie ("4.7 Biological Uptake in Oceans and Freshwater Reservoirs, and Geo-engineering") :

> « Il n'est pas certain que le coût de ces nouveaux systèmes de dispersion seraient moindres que celui des propositions précédentes, comme cela est revendiqué par Teller *at al.*, 1997. Car, bien que la masse du système serait moindre, les disperseurs ('scaterrers') pourraient être beaucoup plus onéreux à fabriquer. Cependant, il est peu probable que le coût jouerait un rôle important dans la décision de déployer un tel système. Même si nous prenons comme valeurs les plus hauts coûts estimés par l'Académie des sciences des Etats-Unis dans leur étude (*US NAS*, 1992), le coût pourrait être très faible comparé au coût d'autres options de mitigation (Schelling, 1996). Il est probable que les problèmes de risque, de politique (Bodansky, 1996), et d'éthique environnementale (Jamieson, 1996) se révéleront être des facteurs décisifs dans les choix réels de mise en œuvre. L'importance des nouveaux systèmes de dispersion tient [, en outre,] non dans leur minimisation des coûts, mais dans leur potentiel à minimiser le risque [environnemental]. Deux des problèmes principaux avec les propositions antérieures étaient leur potentiel impact sur la chimie atmosphérique, et le changement dans le ratio de la radiation solaire diffuse directe sur le blanchissement associé de l'apparence visuelle du ciel ('the ratio of direct to diffuse solar radiation, and the associated whitening of the visual appearance of the sky'). Les propositions de Teller *et al.*, 1997 suggèrent que la localisation, les propriétés de diffusion, et la réactivité chimique des disperseurs pourraient, en principe, être réglés ('tuned') pour minimiser les deux sortes d'impact. Néanmoins, la plupart des articles sur la géoingénierie contiennent des expressions d'inquiétude au sujet des impacts environnementaux inattendus, de notre manque de compréhension complète des systèmes impliqués, et d'inquiétudes concernant les implications éthiques et légales (*US NAS*, 1992; Flannery *et al.*, 1997; Keith, 2000). Au contraire des autres stratégies [de mitigation], la géoingénierie traite les symptômes plutôt que les causes du changement climatique. » [*IPCC (WGIII)*, 2001, p. 334]

Le lecteur appréciera à sa juste valeur le caractère scientiste, positiviste, technophile, du propos. Et le primat donné aux questions techniques, la décision politique ne devant venir que dans un second temps, comme si les programmes de recherche scientifiques et ingénieriques ne généraient pas des dynamiques et des inerties qui reconfigurent les questions politiques… Signalons, par ailleurs, que l'on trouve une vision fortement dépolitisée ("dé-démocratisée") dans la plupart des articles en faveur de la recherche sur la géoingénierie. Nous renvoyons notamment à l'article de référence de Keith sur la géoingénierie, abondamment cité, publié en 2000 dans l'*Annual Review of Energy and the Environment*, sous le titre "Geoengineering the climate. History and prospect" (Keith, 2000), et à l'article Heyward & Rayner (tous deux de l''Oxford Geoengineering Programme'), 2013.

Précisons, enfin, que les deux rapports du GIEC qui suivront (2007, 2014) seront beaucoup moins enthousiastes et beaucoup plus lapidaires au sujet de la géoingénierie. Le Résumé pour les décideurs politiques du « WGIII – 'Mitigation of Climate Change' » du dernier rapport du GIEC ne fait pas mention de la géoingénierie. Sa présence est, en outre, discrète dans le reste du rapport, et il est spécifié que « les technologies de géoingénierie discutées comme dernier recours en réponse aux urgences climatiques » sont jugées peu crédibles (« 'limited evidence' ») et font l'objet d'importantes remises en causes (« 'low agreement' »)… Il n'en demeure pas moins que la géoingénierie est à présent discutée sur un pied d'égalité avec les autres « options », puisqu'elle est affublée des mêmes jugements de valeur que les autres options proposées dans le rapport – *i.e.* les « preuves scientifiques ('evidence') » et l'« acceptabilité sociale ('agreement') »). [*IPCC (WGIII)*, 2014, « Summary for Policymakers » & « Chapter 1 »]

auteurs du WGIII du rapport du GIEC de 2001, pourtant complaisants à l'égard de ces technologies (voir note n° 457 *supra*) –, nous pouvons sérieusement questionner la place de cette expertise sur le coût d'une technologie de géoingénierie du changement climatique dans un rapport « scientifique » d'experts de l'ozone.

Outre la référence à Teller, les deux autres sources citées par les auteurs de l''Assessment of Ozone Depletion' souffrent d'un même soupçon de partialité en faveur de la géoingénierie. Les climatologues Timothy Lenton et Naomi Vaughan demeurent, certes, très circonspects quant à la pertinence de déployer des technologies de géoingénierie, que ce soit dans un futur proche ou éloigné ; mais, ils n'excluent pas une recherche active sur le sujet, « esp[érant] que [leurs] résultats pourraient aider à informer sur les priorités à donner pour des futures recherches sur le sujet ». Quant au rapport de la *Royal Society* de 2009, que citent les auteurs de l''Assessment of Ozone Depletion', il a été signé par la fine fleur des promoteurs de la recherche sur la géoingénierie depuis la fin des années 1990. Le groupe d'expert compte dans ses rangs David Keith, Ken Caldeira, Steve Rayner (de l''Oxford geoengineering Programme'), et son directeur n'est autre que le physicien John Shepherd, Professeur au 'Tyndall Centre for Climate Change', qui avait déjà été dès 2004 à l'initiative d'un 'workshop' sur les « Macro-options ingénieriques pour la gestion et la mitigation du changement climatique ('Macro-engineering Options for Climate Change Management & Mitigation') ». Il avait réuni les plus ardents défenseurs de l'ingénierie du climat (Caldeira, Klaus Lackner, Lowell Wood). Shepherd entendait par ce biais donner une stature nouvelle au programme d'ingénierie climatique et lever des fonds pour sa R&D [Lenton & Vaughan, 2009, p. 2559 ; Vaughan & Lenton, 2011 ; *Royal Society (the)*, 2009 ; Hemert (van), 2013, « communication personnelle »].

Premier point d'analyse, donc : il nous semble essentiel de prendre garde à la personnalité des auteurs que l'on cite. Surtout lorsque, comme dans le cas de la géoingénierie, seule une poignée de scientifiques a envisagé de mettre la géoingénierie sur la liste des options de lutte contre le changement climatique et ses effets, aux côtés des baisses d'émissions de CO_2 et de l'adaptation, depuis que la question a été mise à l'agenda politique au tournant des années 1990.

Deuxième point d'analyse. Au-delà de la question « qui parle ? », que négligent les auteurs de l''Assessment of Ozone Depletion', il faut se poser la question de la légitimité-même à discuter la géoingénierie dans des rapports d'experts internationaux. Les risques environnementaux, nombreux, difficilement prévisibles (donc difficilement maîtrisables) et potentiellement irréversibles des technologies de filtres solaires atmosphériques ont été largement démontrés dans la littérature scientifique (voir par exemple la recension faite

dans Hamilton, 2013, pp. 83-100). On peut légitimement se demander si, au niveau actuel de développement technologique – embryonnaire – pour la modification du climat, même locale, les expertises de l''Assessment of Ozone Depletion', et plus encore celles du GIEC, qui a même organisé les 20-22 juin 2011 à Lima une rencontre sur la géoingénierie (dont a été tiré un rapport spécial [*IPCC*, 2012]), ne créent pas simplement un effet d'entraînement, dans un climat déjà propice à l'« emballement médiatique » sur la géoingénierie que décrivait dès 2006 l'historien James Fleming et qui s'est depuis renforcé [Fleming, 2006], et plus généralement propice à l'emballement, souvent naïf et court-termiste, autour de l'ingénierie environnementale.[458]

En tout cas, nous trouvons aujourd'hui (en 2014) dans une situation surprenante. La grande majorité des scientifiques du climat comme des auteurs en SHS font part de leur stupéfaction face à l'idée de déployer des technologies dangereuses et hautement énergivores de géoingénierie. Pourtant, non seulement les modélisations sur la géoingénierie sont relayées par les experts du GIEC et de l''Assessment of Ozone Depletion', mais l'idée de mener des expériences de terrain, à petite échelle dans un premier temps, fait également rapidement son chemin. Une ONG canadienne de veille technologique et environnementale, l'*ETC Group*, a répertorié treize essais significatifs d'ensemencement 'in situ' des océans par injection de fer, presque tous effectués par des laboratoires privés ou sous partenariat public-privé.[459] En ce qui concerne les injections atmosphériques, des expériences de terrain commencent à tenter des chercheurs de la recherche publique – la seule, semble-t-il, qui peut pour l'instant prétendre légalement mener cette activité –. Les projets voient le jour aux Etats-Unis et au Royaume-Uni.

Certes, l'interdit de mener des expérimentations *in situ* « destructrices », c'est-à-dire qui ne laissent pas les propriétés du lieu inchangées une fois l'expérience achevée, demeure profondément ancré dans la culture des scientifiques de l'atmosphère et du climat (même si, au cours des décennies 1950-60, les Etats-Unis et l'URSS nous ont offert de nombreux exemples de transgression (voir Fleming, 2010)). Mais, la tentation est grande pour les scientifiques de transgresser ce tabou de l'expérimentation 'in situ', afin d'accroître leur pouvoir d'action et leur capacité à théoriser certains mécanismes climatiques. En août 2011,

[458] La question de la géoingénierie dépasse les débats sur l'injection de particules dans la stratosphère, et une analyse historique sur la géoingénierie nécessite de prendre en compte de nombreux aspects éthiques, géopolitiques, de droit, *etc.*, ainsi que les démarches de nombreux acteurs (*LLNL*, entrepreneurs privés, milliardaires bailleurs de fonds, ONG, *etc.*). Nous ne pouvons développer ces points ici. Nous renvoyons à notre article introductif Briday, 2014, et surtout aux deux sommes de référence sur le sujet, à ce jour : Fleming, 2010 et Hamilton, 2013.

[459] A partir de la fin des années 1980, des océanologues ont proposé de « fertiliser » les océans, en y injectant massivement du fer ; ceci favoriserait l'épanouissement du phytoplancton, qui pourrait capturer le carbone atmosphérique en grande quantité, avant de rejoindre, une fois mort, le fond des océans. D'autres ont promu cette technologie de stimulation du développement du phytoplancton à d'autres fins, par exemple la restauration de populations de saumons.

The Guardian annonçait que les chercheurs du projet public *SPICE* (*Stratospheric Particle Injection for Climate Engineering*) s'apprêtaient à injecter de la vapeur d'eau dans la stratosphère au-dessus du comté de Norfolk. Cette expérience était présentée comme une première mondiale, en tant que première expérience de terrain pertinente dans le cadre de la recherche sur la modification intentionnelle des flux radiatifs comme lutte contre le changement climatique.

Finalement, l'équipe *SPICE* annula l'expérience huit mois plus tard, sous la pression de la société civile. Il existe en effet des garde-fous politiques et juridiques contre la géoingénierie. Ils avaient déjà remporté une victoire avec l'adoption d'un moratoire sur l'ensemencement des océans par injection de fer, par la Convention sur la diversité biologique, en 2008. Il n'en demeure pas moins que, pour les experts scientifiques et plus généralement les scientifiques de l'ozone et du climat, la question de Mark Lawrence se pose toujours aujourd'hui avec acuité : faut-il parler de la géoingénierie dans des rapports internationaux de référence, même si on le fait avec plus de précautions que lorsqu'on parle des réductions d'émissions ou de l'adaptation ? En parler n'est pas neutre. Introduire une technologie de modification du climat, ou même de capture du CO_2 dans l'atmosphère (e.g. les arbres artificiels de Lackner), ou introduire ne serait-ce qu'un discours sur ces technologies, va changer la nature des débats climatiques. Certains 'think tanks' libéraux et néoconservateurs états-uniens (*Heartland Institute*, *American Enterprise Institute*, *Cato Institute*) l'ont bien compris, qui ont récemment complété leurs discours lénifiants voire "sceptiques" au sujet du changement climatique, par une promotion de la recherche sur la géoingénierie pour contrebalancer le changement climatique "au cas où" le problème se révélait effectivement dangereux pour l'humanité (et surtout pour les Etats-Unis). [Hamilton, 2013 ; Briday, 2014 ; Hulme, 2014, chapter 3 ; Hamilton, 2013, pp. 129-144]

L'affaire *SPICE* a inspiré au politiste Mike Hulme la démonstration suivante : aucune gouvernance internationale viable ne saurait être imaginée au sujet des technologies d'injection d'aérosols dans la stratosphère ; par conséquent, à quoi bon en appeler à plus de recherche scientifique sur le sujet ? Et à quoi bon laisser espérer, comme le font les experts de l''Assessment of Ozone Depletion'de 2010 eux aussi, que le progrès technologique pourrait conduire à une minimisation des coûts environnementaux et économiques, jusqu'à devenir, peut-être "acceptables" ? En effet, *en ce qui concerne la technologie d'injection de particules réfléchissantes dans la stratosphère* (nous soulignons, car les autres technologies de géoingénierie mériteraient une analyse particulière), les objections d'ordre géopolitique formulées sont manifestement dirimantes : le développement de la littérature sur la géoingénierie climatique va nécessairement s'accompagner d'études sur les armes météorologiques et climatiques ? ; et surtout, comment arbitrera-t-on les inévitables

controverses qui émergeront, entre des régions qui demanderont la réparation des préjudices qu'ils clameront avoir subi d'une expérience de modification du climat, et des experts ?… avec comme effet collatéral très important encouru des suspicions vis-à-vis des autres pays, ainsi que des experts internationaux. Car, il y aura nécessairement des gagnants et des perdants. « Le climat ne peut pas être nationalisé », comme le formulait Klaus Meyer-Abich, alors qu'il réfléchissait déjà, en 1981, aux limites d'un recours à des « technologies de compensation » du changement climatique, dont la géoingénierie [Meyer-Abich, 1981, p. 167]. Dans ce cadre, et même en mettant de côté les mises en garde générales au sujet du déploiement de technologies à grande échelle, il est beaucoup plus sage de privilégier une approche qui vise les émissions de CO_2, dont la réduction ne saurait être en soi un objet de controverse, qu'une approche d'intervention sur le climat qui engendrera nécessairement de multiples polémiques.

Troisième et dernier point d'analyse. Si l'on répond "oui" à la question "Faut-il parler de la géoingénierie, de toutes les propositions de géoingénierie, dans la littérature et l'expertise en sciences de la nature ?", la question "Comment en parler ?" suit immédiatement. Voilà comment nous la formulerions : comment ne pas banaliser la géoingénierie, ou plus généralement les pratiques de modification intentionnelle du climat (et du temps), en les réduisant à une question technique (technologique et technocratique), où l'avis d'experts l'emportera nécessairement un jour au nom de l'urgence à agir et des coûts à consentir (voir aussi notre (voir note n° 457 *supra*) ? Comme nous l'avons défendu dans notre article sur la géoingénierie, il faut prendre garde que l'actuel emballement médiatique pour la géoingénierie, voire plus généralement pour la maîtrise du temps et du climat, ne se résume pas à un débat technicien qui mésestimerait les visées idéologiques et marchandes de leurs partisans, et qui ferait l'économie de réfléchir aux agencements sciences-sociétés nouveaux que pourraient générer la recherche sur de telles technologies et leur déploiement. [Briday, 2014]

Deux points nous semblent déjà acquis. Premièrement, la géoingénierie ne « résoudra » pas le problème climatique, mais le reconfigurera, scientifiquement et politiquement. Deuxièmement, l'ingénierie environnementale à moyenne et grande échelle ne saurait faire bon ménage avec une pratique scrupuleuse de la démocratie.

8.3. Chimie troposphérique et changement climatique. L'exemple de l'introduction des modèles de chimie dans les rapports du GIEC

D'après la Figure 39 ci-dessous, extraite du quatrième rapport du GIEC, ledit rapport, daté de 2007, serait le premier rapport du GIEC à recenser des simulations globales intégrant la chimie atmosphérique (comprendre : les interactions chimiques atmosphériques sont prises en compte dans certains modèles, non plus uniquement sous la forme de paramétrisations, mais également d'équations valables à l'échelle de la maille des modèles).

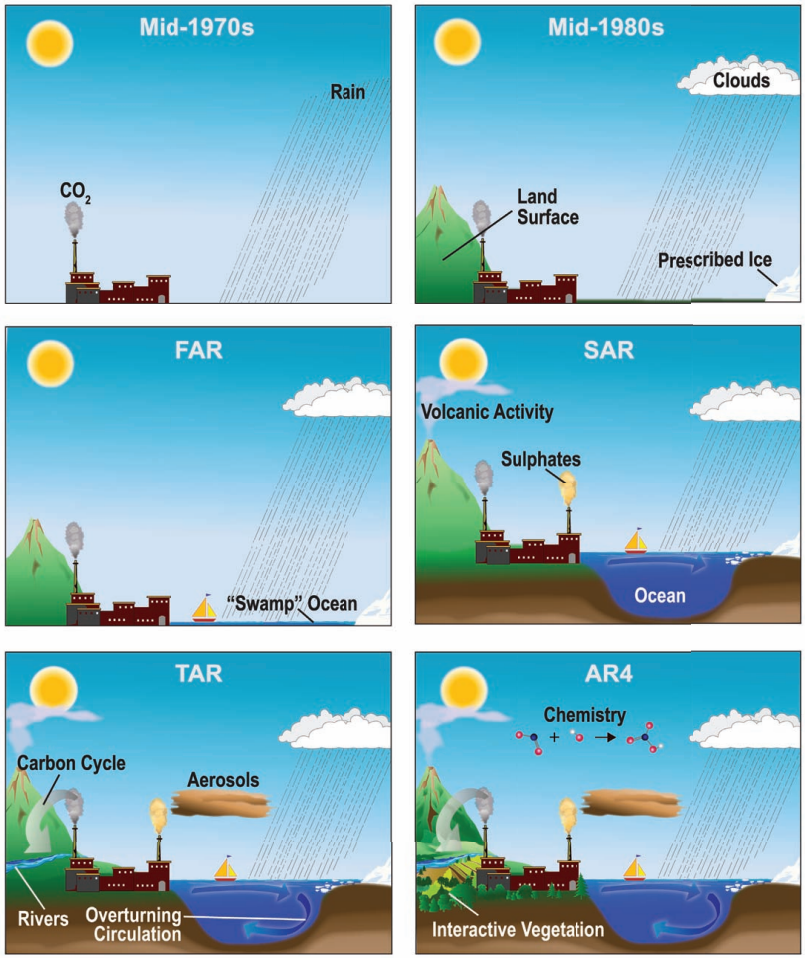


Figure 39 : Complexification des modèles climatiques au cours des dernières décennies (milieu des années 1970 ; milieu des années 1980 ; Premier rapport du GIEC (FAR, 1990) ; Deuxième rapport (SAR, 1995) ; Troisième rapport (TAR, 2001) ; Quatrième rapport (AR4, 2007), telle que résumée schématiquement par les experts du Groupe I ('Working Group I', 'the Physical Science Basis') du Quatrième rapport du GIEC

[*IPCC (WG I)*, 2007, WGI, « Figure 1.2 », p. 99]

Comme nous le montrons dans ce Sous-chapitre 8.3, certains modèles globaux de chimie ont en fait été utilisés dès le Deuxième rapport. Cependant, peu nous importe ici qui furent les "pionniers" de la modélisation de la chimie pour le GIEC. L'enjeu de ce Sous-chapitre est autre : identifier les scientifiques, laboratoires et traditions de recherche, qui ont présidé à l'intégration de la chimie atmosphérique – et en particulier de la chimie troposphérique, la plus décisive pour la science climatique – dans les modèles globaux du GIEC.

Introduction. Prolégomènes aux modèles du GIEC

Les scénarios d'émissions et de concentrations

Comme nous l'avons indiqué dans l'introduction du chapitre, nous avons opté pour une analyse des modèles numériques utilisés par le GIEC, comme point de départ de la construction de notre récit de l'intégration de la chimie dans la science du changement climatique. La raison est simple. Comme le rappelle Hélène Guillemot, historienne et anthropologue des modélisations climatiques au Centre Alexandre Koyré : les modèles du climat, et en particulier ceux du GIEC, dont les rapports servent de base à la majorité des négociations de politiques sur le CC, sont les « seuls instruments capables de nous projeter vers l'avenir du climat de notre planète ». En fournissant des projections de climats futurs sur la base de différents scénarios d'émission de gaz à effet de serre, ils constituent « la pièce maîtresse de l'expertise climatique » pour la décision politique. [Guillemot, 2007(b), pp. 93-94]

L'élaboration de ces scénarios n'incombe pas aux spécialistes « scientifiques » du Premier groupe du GIEC ('WG I'), parmi lesquels se trouvent les quelques chimistes de l'atmosphère globale dont nous allons parler, mais à des économistes, des sociologues, des biologistes (qui s'intéressent aux interactions entre cycles du carbone et couvertures végétales et forestières), *etc.* Bien que reconnaissant l'enjeu politique décisif qu'elle revêt, nous ne reviendrons pas sur la construction de ces scénarios – que nous avions vu intégrer les rapports d'experts sur les pluies acides et la destruction de l'ozone au début des années 1980 (voir Chapitres 3 et 7, respectivement). Précisons simplement que, dans leurs quatre premiers rapports, les experts du GIEC raisonnent *à partir de* scénarios *d'émissions*, puis cheminent d'après un schéma « linéaire » (ou « séquentiel »), comme suit : 'Pression' ('Emissions') => 'State' ('Radiative forcing') => Impact ('Climate projections') => Responses ('Impact, Adaptation, Vulnérability' (Voir Figure 40 ci-dessous). Dans le cinquième rapport (2014), cette logique est en partie reconduite, certaines modélisations utilisant les scénarios d'émissions SRES ('Special Report on Emissions Scenarios') définis en 2000. Mais, d'autres modélisations utilisent des trajectoires de *concentrations (et non, d'émissions*) de gaz à effet de

serre (définis en équivalent-CO_2), les RCP ('Representative Concentration Pathways'). Le schéma de travail dans lequel elles s'insèrent est dit « parallèle » ; il a été adopté afin de permettre aux communautés de travailler de manière plus indépendante (Voir Figure T(b) ci-dessous). [Guillemot, 2007(b), pp. 93-94 ; Armatte & Dahan, 2014 (à paraître), pp. 11-13, « communication personnelle][460]

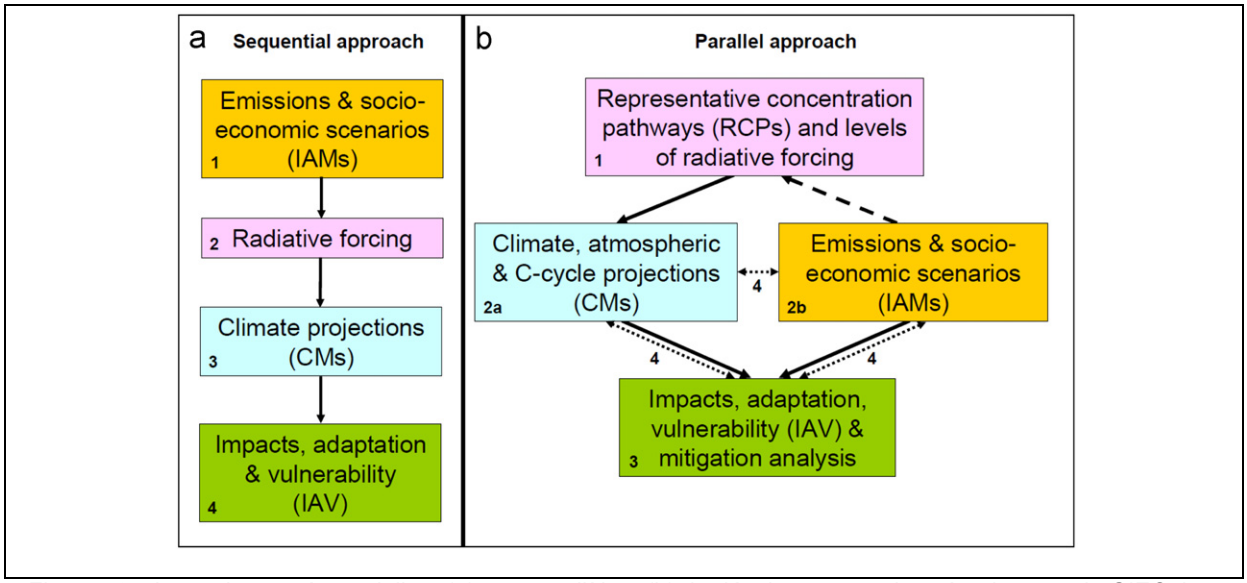


Figure 40 : Approches « séquentielle » (a) et « parallèle » (b) de développement de scénarios pour le GIEC. Les nombres correspondent aux étapes de l'analyse (2a et 2b procèdent de manière concomitante). Les flèches

[460] L'historien de l'économie Michel Armatte a consacré des travaux aux scénarios socio-économiques standards élaborés à l'attention du GIEC. Comme l'explique Armatte & Dahan, 2014,

> ces « scénarios expriment, par des prévisions numériques et par les récits qui en assurent la cohérence spatiale et temporelle (les *story lines*), les hypothèses retenues quant au forçage du système climatique par les perturbations anthropiques, c'est-à-dire dues à l'évolution des activités humaines dans les principaux secteurs qui ont des répercussions sur le climat : énergie, industries, transport, pratiques agraires et forestières, urbanisation... [… Les scénarios] qui furent établis par le GIEC [en] 2000 (Rapport spécial sur les scénarios SRES), fondés sur des critères variables d'ouverture et de durabilité des économies (plus ou moins de protectionnisme, plus ou moins de productivisme), en particulier dans leurs choix énergétiques, ont fourni un cadre à toutes les simulations effectuées pour les quatre premiers rapports du GIEC. Les scénarios sont [ensuite] injectés en input de modèles dits d'évaluation intégrée pour évaluer l'effet de diverses politiques économiques et environnementales. »
>
> Les modèles d'évaluation intégrée (IAM, 'Integrated Assessment Models') qui produisent ces scénarios « sont en général à structures modulaires (comme le modèle IMPACT de l'alimentation mondiale); ils intègrent un module démographique, des modules économiques généraux, des modules sectoriels, et des modules climatiques sommaires. Leur construction combine des approches top-down, des approches bottom-up, et une forme issue de la dynamique des systèmes à l'œuvre dans le modèle World 3 du Club de Rome (voir le modèle IMAGE, *cf.* Armatte, 2007). » Dans le cadre du GIEC, les IAM servent à réaliser « une expertise des impacts et des politiques de réduction ou d'adaptation, expertise relevant d'un schéma logique linéaire et séquentiel de type PSIR (*pression, state, impact, responses*) calqué sur la structuration même du GIEC en trois groupes. Ils peuvent être associés à d'autres outils de calcul économique de type coût-bénéfice, comme le rapport Stern (2006) l'a illustré. Ce qui caractérise une telle modélisation intégrée est donc moins la nature du modèle lui-même, que sa mobilisation, par le réseau d'acteurs qui vont le faire vivre et évoluer, et le cadrage de l'expertise auquel l'outil et les acteurs vont contribuer : une évaluation de coûts ou de politiques, la négociation d'un dispositif ou d'un protocole, etc. […] Fondés sur des critères variables d'ouverture et de durabilité des économies (plus ou moins de protectionnisme, plus ou moins de productivisme), en particulier dans leurs choix énergétiques, [ces scénarios d'émission] sont injectés en input de modèles dits d'évaluation intégrée pour évaluer l'effet de diverses politiques économiques et environnementales. » [Armatte & Dahan, 2014]

Les scénarios d'émissions actuels du GIEC ont été définis par le Rapport spécial sur les scénarios (SRES, 'Special Report on Emissions Scenarios') de 2000. La même logique présidait dans les quatre premiers rapports. Par contre, dans le cadre de la préparation du quatrième rapport (2007) écrit Amy Dahan, « les climatologues avaient grandement souffert, même en matière d'emploi du temps, de leur lourde dépendance à la communauté des économistes qui produisaient les IAM ». Il fut donc décidé que l'on substituerait au schéma linéaire de l'approche « séquentiel » (Figure T (a)), un schéma « parallèle » avec des trajectoires de concentrations atmosphériques, les RCP ('Representative Concentration Pathways'), et non plus des scénarios d'émission (Figure T (b)). Ceci permettait aux climatologues de travailler de manière plus indépendante [Dahan, 2010, pp. 289-290]. Précisons que, en fait, le cinquième rapport (2014) combine les deux approches SRES/séquentiel et RCP/parallèle.

indiquent les transferts d'information (lignes pleines), la sélection de chemins de concentrations RCP (tirets), et l'intégration d'information et les rétroactions (lignes pointillées)

[Moss *et al.*, 2007 **in** Dahan, 2010, p. 290]

De la confiance dans les modèles

Depuis la fin des années 1980, les climatologues s'appuient sur leurs simulations numériques pour réitérer leurs avertissements sur les risques importants que font courir les émissions de GES. La médiatisation importante des résultats de modélisation a fait d'elle le principal objet de controverse. Non seulement les scénarios, mais également la matrice épistémologique des modèles et les pratiques de modélisation des climatologues ont été vivement attaquées… Ce qui n'est pas sans rappeler les attaques des industriels et de Richard Scorer que nous avons décrites pour l'affaire de l'ozone des années 1970 (voir Chapitre 5).

La confiance dans les modèles est également au cœur des discussions dans les revues avec comité de lecture et les réunions du GIEC. Toutefois, le ton est beaucoup moins polémique, dans la mesure où la communauté des scientifiques du changement climatique exprime, par la voix du GIEC et des grandes institutions de recherche spécialisées dans le changement climatique, un consensus « pratiquement général », y compris sur les incertitudes, comme l'avait conclu H. Guillemot. Il n'en demeure pas moins délicat de parvenir à des compromis entre : d'une part, un tropisme des scientifiques pour une complexité croissante des modèles, tropisme "naturel" en phase de "science normale" (*cf.* Kuhn), et renforcé par l'augmentation spectaculaire du nombre d'études sur le changement climatique et par la puissance croissante des ordinateurs ; et, d'autre part, le risque d'accroître les incertitudes des résultats des modélisations, à mesure que l'on intègre de nouveaux paramètres et de nouveaux résultats de mesure. [Guillemot, 2007(b), pp. 93-94][461]

[461] Pour une histoire épistémologique et politique "internationale" des modèles numériques du CC et des scénarios économiques de 1950 à nos jours, nous renvoyons à Edwards, 2011, et aux travaux des historiens du Centre A. Koyré, Hélène Guillemot, Amy Dahan et Michel Armatte. En particulier, à Guillemot, 2010 & 2007 (a & b), à Dahan, 2010 et Armatte & Dahan, 2004 & 2014, ainsi qu'à l'ouvrage collectif *Les modèles du futur. Changement climatique et scénarios économiques : enjeux scientifiques et politiques* (Dahan (Dir.), 2007). Matthias Heymann (Aarhus University, Danemark), historien de l'expertise et des politiques de pollution de l'air en Europe, a également publié, en 2010, plusieurs articles sur la modélisation de l'atmosphère et du climat. Au cours de la même année, M. Heymann et Gabriele Gramelsberger (Freie Universität Berlin, Allemagne) avaient organisé un grand 'Workshop' international à Aarhus (10-12 juin 2010), intitulé *Exploring Epistemic Shifts in Computer Based Environmental Sciences*. Il avait pour but de « développer de nouvelles stratégies interdisciplinaires et collaboratives de recherche en 'Science & technology studies', appropriées à l'étude de la révolution informatique et ses impacts sur les sciences de l'environnement » [http://hsozkult.geschichte.hu-berlin.de/tagungsberichte/id=3211&view=pdf (12/03/2014)]. Et, le numéro spécial "Modelling and Simulation in the Atmospheric and Climate Sciences" de *Studies in History and Philosophy of Modern Physics* (*Studies in History and Philosophy of Science, Part B*, Volume 41, Issue 3, 2010), avec pour rédacteurs en chef M. Heymann et Helge Kragh, offrait un éventail d'approches historiques, épistémologiques et politico-culturalistes sur la modélisation de l'atmosphère et du climat. Voir la présentation de ce numéro spécial qu'en fait Heymann, 2010 (b), "Understanding and misunderstanding computer simulation: The case of atmospheric

Comme nous l'avons précisé dans l'introduction du chapitre, l'aspect confiance dans les modèles *de chimie atmosphérique* ne sera pas central dans notre analyse. En effet, les arguments scientifiques engagés dans les controverses sur la science du changement climatique ne sont pas – à de rares exceptions près – liés au caractère chimiquement réactif des composés atmosphériques. L'intégration de la chimie atmosphérique dans les modèles du changement climatique est récente et encore faible à ce jour. Nous nous attacherons donc plutôt à exposer *les enjeux inhérents aux politiques des pollutions et aux politiques de recherche* qui ont présidé à l'intégration de nouveaux aspects de chimie dans les modèles du changement climatique, et en particulier du GIEC. En d'autres termes, nous chercherons à décrire la généalogie, et les raisons de l'intégration, de certaines thématiques de chimie et de chimistes au profil nouveau dans la science du changement climatique, en partant d'une étude sur l'entrée de la chimie dans les modèles numériques du GIEC.

Présentation des modèles globaux intégrant la chimie (CTM et CCM)

Mais avant toute chose, il nous faut présenter, dans ses grandes lignes, l'épistémologie des modèles de chimie-transport (CTM, 'Chemistry-transport models') et chimie-climat (CMM, 'Climate-chemistry models'). Cette connaissance est un prérequis à la lecture de ce Sous-chapitre.

Premier point. Dans le Chapitre 5, nous avons repris les conclusions de l'historien des sciences et des techniques Matthias Heymann, qui exposait les séquences de développement de l'un des tout premiers modèles numériques dits "de chimie-transport", le modèle de photochimie troposphérique 'Urban Airshed Model' (UAM) de l'équipe de John Seinfeld, en Californie, au début des années 1970. M. Heymann décrit un développement en trois phases, qu'il nomme « lumping », « testing » et « tuning ». La première étape dite de « regroupement ('lumping') » est propre à la modélisation de la chimie, puisqu'elle permet de réduire le nombre d'équations chimiques (soit en minorant l'influence de certaines dans l'atmosphère réelle, soit en regroupant plusieurs équations en une seule, en assimilant plusieurs composés à un seul, sous prétexte de leur appartenance à une même famille chimique) [Heymann, 2010].

La description des trois pratiques, que réalise M. Heymann pour le développement de modèles de photochimie troposphérique régionale au début des années 1970, vaut pour les modèles de chimie stratosphérique et l'ensemble des CTM, des années 1970 à nos jours… Même si, bien sûr, les procédures de « lumping », et surtout de « testing » (la comparaison des données mesurées et des résultats des simulations, et la comparaison des résultats de

and climate science—An introduction". Enfin, sur la modélisation du CC en France, nous renvoyons à la thèse d'Hélène Guillemot (Guillemot, 2007 (a)).

simulation entre eux) et de « tuning » (qui mène en particulier à l'élaboration de ce que les scientifiques de l'atmosphère appellent des "paramétrisations") ont changé depuis les années 1970. Nous n'avons pas consacré de travail spécifique à l'évolution des procédures d'élaboration et de validation des CTM.

Deuxième point. Dans le jargon des scientifiques de l'atmosphère, un modèle numérique de chimie atmosphérique, ou modèle de chimie-transport (CTM), est avant tout « un outil intégrateur permettant de quantifier la contribution des différents facteurs contrôlant l'évolution des concentrations des composés atmosphériques », explique Bernard Aumont, chimiste de l'atmosphère au LISA (Laboratoire Interuniversitaire des Systèmes Atmosphériques) de Créteil (CNRS/Paris 12). Un modèle numérique joue, tantôt un « rôle diagnostique » d'« exploitation et d'interprétation » des données de terrain (par des interpolations, par l'établissement de tendances statistiques, *etc.*), tantôt un « rôle pronostique » de prévision d'épisodes de pollution, d'étude d'impact, ou encore de stratégie de réduction des émissions. Mais, précise B. Aumont, l'objectif premier assigné aux modélisations de chimie-transport est bel et bien de « simuler l'évolution spatio-temporelle des concentrations de polluants », en « tent[ant] de reproduire les différents phénomènes agissant d'une part sur les quantités de matière en présence (émission, dépôt, transformations chimiques) et d'autre part sur leurs distributions spatiales (advection, diffusion turbulente, convection). » [Aumont, 2005, p. 27]

Un CTM combine généralement un modèle (ou « module de calcul ») émission/dépôt (source/puits), un modèle météorologique (ou « de transport ») et/ou climatique, et un modèle de chimie, comme l'illustre le diagramme ci-dessous, présentant les différents éléments d'un CTM (Figure 41 ci-dessous).

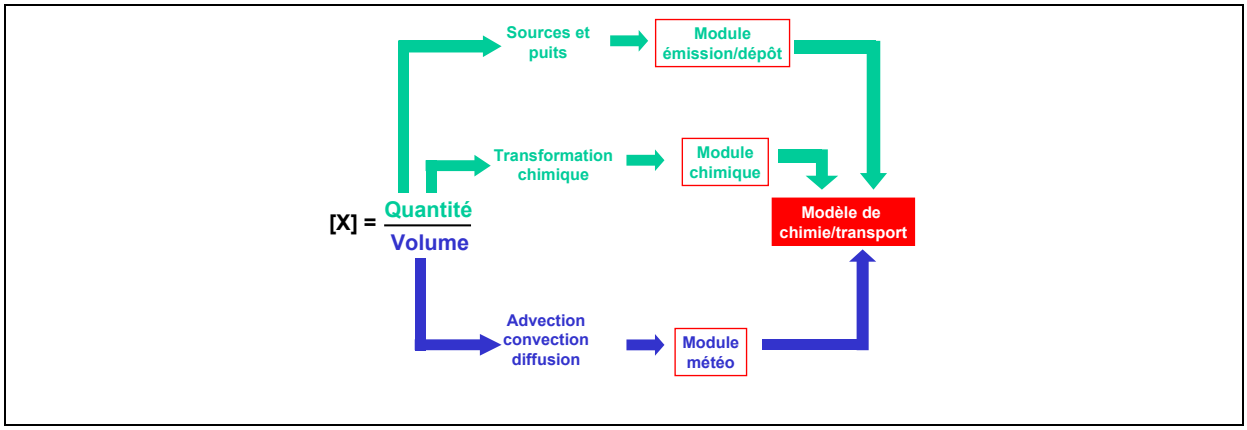


Figure 41 : Diagramme présentant les trois éléments modulaires (parfois nommés « modules » comme ici, ou « modèles ») qui composent typiquement un CTM
[Aumont, 2014, « diapositive n°3 »]

A ces trois « sous-modèles » ou « modules », il faut ajouter un quatrième algorithme contraignant, qui impose les « conditions initiales » et les « conditions aux limites » de la maille – la maille (ou cellule) d'un modèle représentant l'unité de volume dans laquelle les concentrations simulées sont moyennées.

Troisième point. Il existe deux grands « types » de modèles : le modèle « lagrangien », ou « d'écoulement », qui simule les concentrations en fonction du temps pour différentes localisations) ; le modèle « eulérien », ou « de dispersion », qui simule l'évolution des concentrations en fonction du temps sur tout le domaine spatial considéré. Ce domaine est souvent divisé en mailles. Les changements de la composition chimique sont alors simulés pour chaque maille.

La taille des mailles utilisée détermine la résolution spatiale du modèle (voir Tableau 4 ci-dessous).

Modèle	Domaine typique	Résolution typique
Micro échelle	200 × 200 × 100 m	5 m
Méso échelle (urbaine)	100 × 100 × 5 km	2 km
Régional	1000 × 1000 × 10 km	20 km
Synoptique (continentale)	3000 × 3000 × 20 km	80 km
Global	65000 × 65000 × 20 km	5° × 5°

Tableau 4 : Les différents types de modèle, classés selon leur résolution spatiale
[Aumont, 2014, diapositive n°6]

Les « dimensions » du modèles sont définies comme suit (Figure 42) :

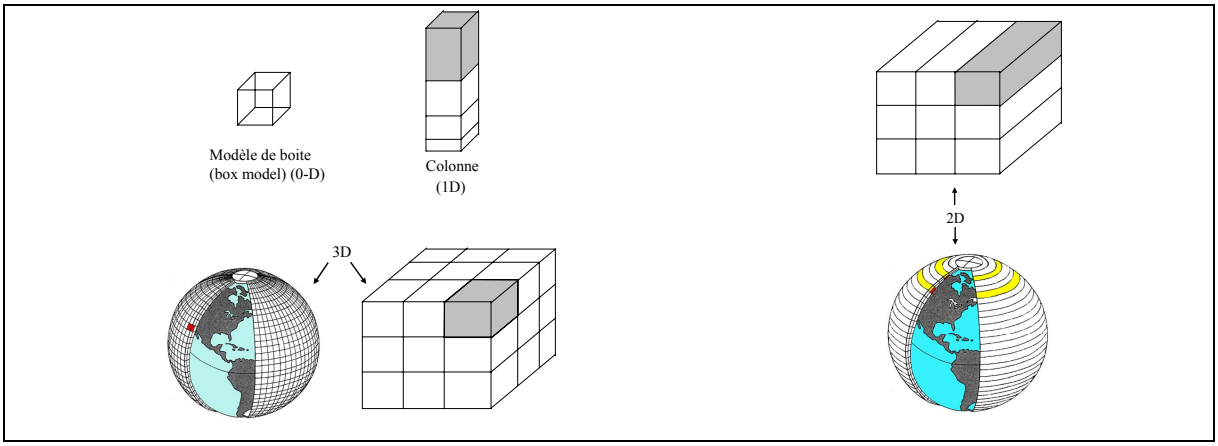


Figure 42 : Les quatre types de dimension des modèles (0-D, 1-D, 2-D, 3-D)
[Aumont, 2014, diapositive n°7]

La Figure 43 ci-dessous offre des exemples de schéma de modélisation chimique en 0-D et 1-D :

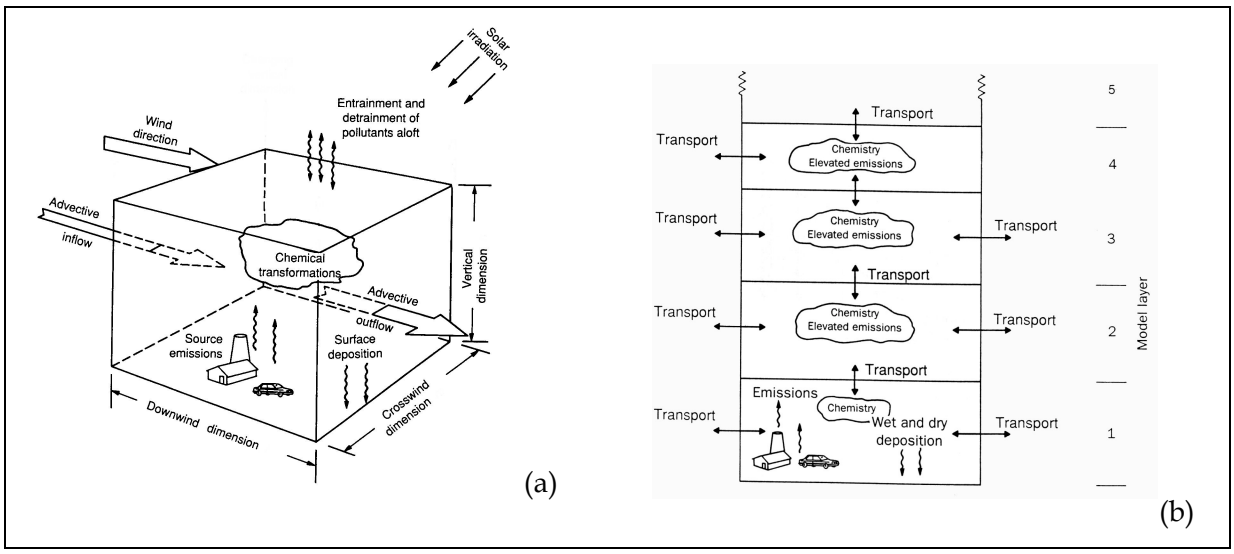


Figure 43 : Exemple de diagrammes schématiques de deux CTM eulériens, (a) l'un à zéro dimension, et (b) l'autre à une dimension (l'altitude) [http://irina.eas.gatech.edu/ATOC3500_Fall1998/Lecture29.pdf (10/03/2014)]

Quatrième et dernier point de généralité sur l'épistémologie des CTM. Lorsqu'aucune équation n'est apte à calculer des paramètres physiques ou chimiques à l'échelle de la maille mais seulement à une échelle inférieure, ou lorsque des calculs de formules théoriques (par opposition à empiriques ou statistiques) risqueraient "d'alourdir" le modèle au-delà des capacités de calcul des ordinateurs disponibles, les modélisateurs ont recours à des « paramétrisations ». « Il n'existe pas de méthode universelle de paramétrisation », explique H. Guillemot. Les pratiques diffèrent selon les mécanismes physiques ou chimiques à décrire, selon la connaissance qu'en ont les scientifiques et selon l'objectif recherché. Certaines paramétrisations sont générées par des modèles « spécifiques à petite échelle » ; d'autres sont obtenues « à l'aide de mesures de terrain » et de laboratoire. La paramétrisation des nuages demeure l'une des plus périlleuses, que ce soit dans les modèles de météorologie ou de CC. Dans les modèles de chimie, la diffusion turbulente à l'échelle de la maille, par exemple, est souvent estimée à l'aide de paramétrisations, calculées à partir de données météorologiques passées. [Aumont, 2014 ; Guillemot, 2007, pp. 99-101]

Les *processus physico-chimiques pris en compte dans les CTM* sont multiples. La Figure 44 ci-dessous en donne des exemples inhérents à des enjeux environnementaux :

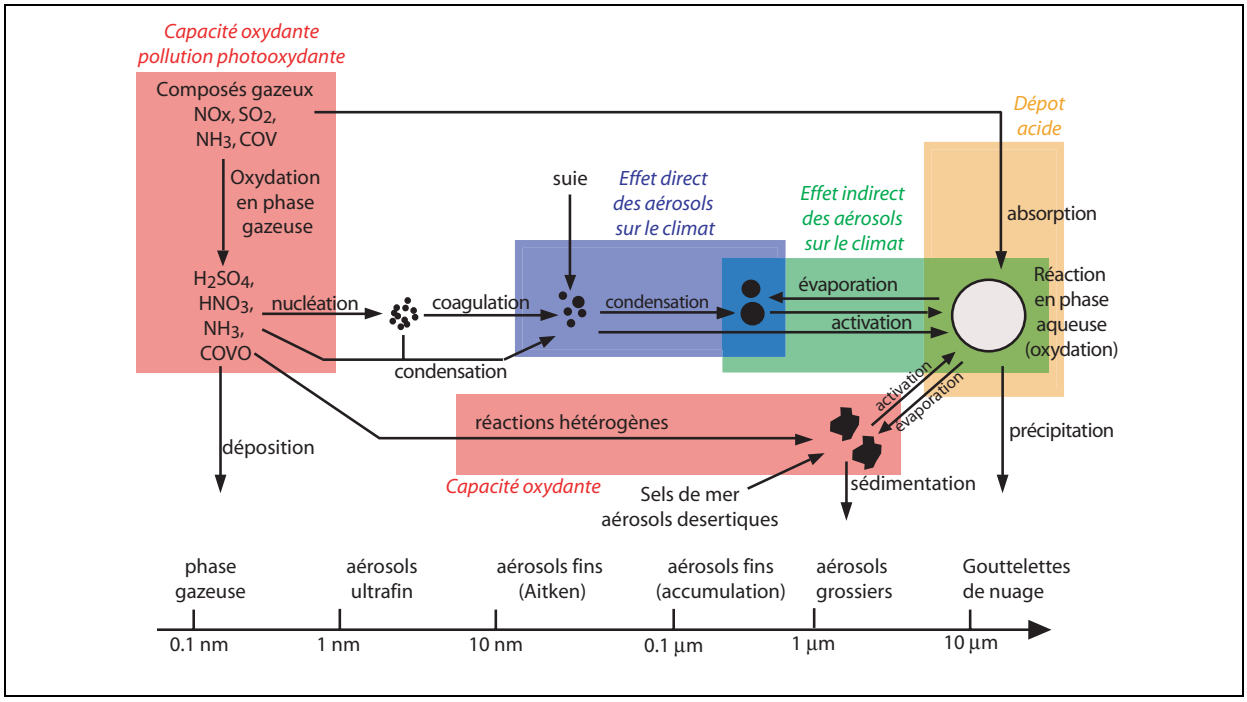


Figure 44 : Relation entre les divers processus physico-chimiques atmosphériques (oxydation en phase gazeuse, formation et évolution des aérosols et des nuages) et les principaux enjeux environnementaux auxquels ils sont épistémologiquement liés
[Aumont, 2004, p. 86]

« Il existe des modèles physico-chimiques pour la plupart des processus décrits dans cette figure », affirmait son auteur B. Aumont, en 2005. [Aumont, 2005, p. 86]

Qu'en est-il, à présent, *spécifiquement de la modélisation de la chimie dans la science du CC* ? Deux catégories de modèles couplés sont utilisées par les scientifiques du changement climatique. D'abord, des *CTM globaux*, qui estiment les effets directs et indirects des réactions chimiques atmosphériques sur les concentrations en GES et aérosols, mais ne prennent pas en compte les rétroactions avec le phénomène de changement climatique. Ensuite, des *modèles de chimie-climat (CCM, 'Climate-chemistry models') globaux*. Ces modèles cherchent à représenter l'action directe ou indirecte des réactions chimiques atmosphériques sur la circulation générale des masses d'air, et donc le climat global ; et, en retour, à estimer les impacts du changement climatique sur les mécanismes de chimie atmosphérique, et notamment sur la production de polluants secondaires tels que l'ozone (soit parce que ce sont des GES, soit parce qu'ils posent des problèmes de qualité de l'air) [Aumont, 2006, p. 27 ; Schnell *et al.*, 2014]. Certains CCM couplent un modèle de chimie et un modèle de circulation générale atmosphérique (AGCM, 'Atmospheric Global Circulation Models'). Ce dernier a été le premier type de modèle développé pour simuler la météorologie et le climat globaux, puis le phénomène de changement climatique anthropique à partir des années 1970. D'autres modèles globaux plus récents combinent un modèle de chimie et un modèle de circulation générale atmosphère-

océan (AOGCM, 'Atmosphere-Ocean General Circulation Models').[462] Enfin, les plus complexes, les modèles du Système Terre (ESM, 'Earth System Models'), intègrent des modèles de cycles biogéochimiques globaux.

C'est le cas d'un des modèles actuels de l'IPSL (Institut Pierre-Simon Laplace, France). Au début des années 2000, le modèle développé par l'IPSL pour le GIEC, le LMDzt, couplait uniquement un modèle de circulation générale atmosphérique, le LMDz (développé depuis les années 1970 au Laboratoire de Météorologie Dynamique (LMD), aujourd'hui membre de l'IPSL), et un modèle de chimie, INCA ((INteraction avec la Chimie et les Aérosols), développé principalement au laboratoire des Sciences du Climat et de l'Environnement (LSCE) de l'IPSL). Le diagramme de ce modèle couplé primitif apparaît dans la partie centrale dite « 'Atmosphere' » de la Figure 45 ci-dessous (sur fond orange). A la fin des années 2000, l'IPSL proposait une version beaucoup plus « intégrée » de son modèle, un modèle dit « du Système Terre » (ESM, 'Earth System Model') (Figure 45 ci-dessous).

[462] Les 'GCM' (Global Circulation Models') forment encore aujourd'hui le cœur des modèles du changement climatique. Les GCM primitifs des années 1970 étaient des modèles atmosphériques, des AGCM ('Atmospheric Global Circulation Models'). Ils avaient été développés principalement par des météorologistes, qui utilisaient les GCM aussi bien pour la prévision du temps que pour étudier le climat et prédire le changement climatique. L'historienne des sciences Amy Dahan résume ainsi le fonctionnement et l'histoire des (A)GCM :

> « Les GCM cherchent à simuler les mouvements de l'atmosphère sur la base de lois de la physique. L'atmosphère est représentée comme une grille tridimensionnelle. Le modèle numérique [, un ensemble d'algorithmes rentrés dans un ordinateur,] calcule les variables qui caractérisent l'état de l'atmosphère (température, pression, vent et humidité) pour chaque cellule (ou maille) de la grille, et pour chaque intervalle de temps, à partir de valeurs de l'intervalle de temps précédent. [… Une petite partie du modèle fonctionne à l'aide, non de lois physiques, mais de] paramétrisations, qui estiment, sur une base statistique, les effets sur le climat de phénomènes qui ne peuvent se comprendre qu'à une échelle plus petite que la maille. […]
>
> « Dans les années 1970, un modèle climatique était simplement un modèle atmosphérique avec des conditions de surface et une composition chimique prescrites ('prescribed'), dont les résultats (les simulations) étaient interprétés de manière statistique. La conception du climat qui émergea de ces modèles était celle de "temps (ou sens météorologique) moyen", calculé statistiquement sur des périodes de 30 ans (cette gamme temporelle fut établie par l'OMM). Les phénomènes intrinsèques à ce climat étaient basés sur des évolutions de l'atmosphère [bien étudiées] (température, précipitations, vents, *etc.*), mais ces contours physiques et facteurs déterminants demeuraient imprécis. L'approche montrait de grandes limites, car certaines conditions prescrites comme la température du sol sont largement dépendantes de l'état de l'atmosphère, et aurait dû par conséquent être calculées par le modèle, plutôt que prescrites 'a priori'. […]
>
> « [… Les limites des GCM ne s'arrêtaient pas au calcul de la température du sol. De manière plus générale,] les valeurs frontières ('boundary values') sont toujours hautement problématiques dans les GCM climatiques. En particulier, au niveau de la surface de la Terre : l'interaction de l'atmosphère avec les océans, les surfaces de glace, la végétation, *etc.* […] La première tentative d'intégration de la couverture végétale dans les scénarios du climat fut réalisée dans les années 1970 par le japono-états-unien Suki Manabe au sein du Laboratoire de géophysique de la NOAA. [… Des initiatives semblables furent prises de manière concomitante au sujet des océans. Mais, il faudra attendre le début des années 1990 pour voir] le lancement de la construction de modèles couplés atmosphère-océan, aussi bien aux Etats-Unis qu'en Europe. »[Dahan, 2010, pp. 284-285]

D'autres intégrations suivront, dont celle des interactions chimiques atmosphériques, dont nous faisons l'histoire dans ce Sous-chapitre.

Pour une histoire longue et détaillée des GCM, nous renvoyons à Edwards, 2011.

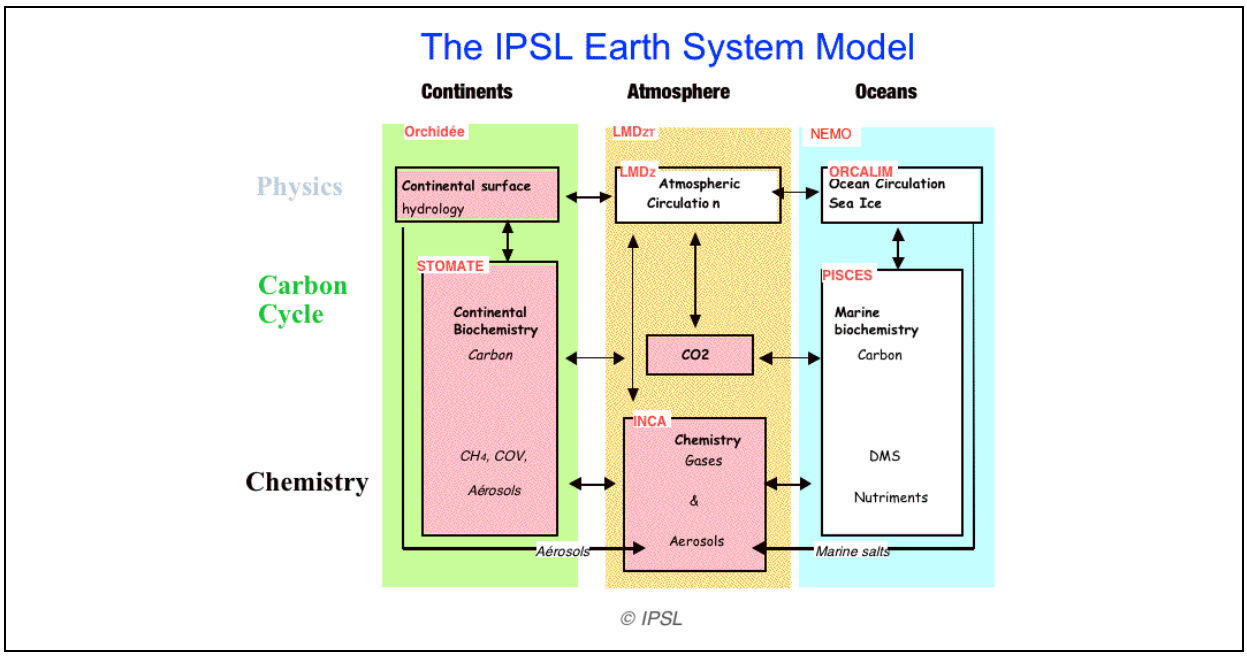


Figure 45 : "The IPSL Earth System Model", également nommé LMDz-OR-INCA [Site internet de l'*IPSL*, 2014, http://www.ipsl.fr/en/content/view/full/886(10/03/2014)]

Une version de complexité moindre, un modèle LMDz-OR-INCA, composée des modèles LMDz, ORCHIDEE et INCA mais excluant ORCALIM et PISCES, est cité par les auteurs du cinquième et dernier rapport du GIEC [*IPCC (WG I)*, 2014, "Figure 11.23a. Projected changes in annual mean surface O_3 (ppb mole fraction) from 2000 to 2100 following the RCP scenarios"]. En effet, et nous insistons sur ce point, le développement d'un ESM n'a *pas* empêché le développement concomitant de modèles de complexité intermédiaire. En outre, chaque "sous-modèle" de l''IPSL Earth System Model' est un modèle à part entière, développé par une communauté propre, avec ses procédures particulières. Les développements du LMDzt sont effectués la plupart du temps indépendamment des développements du modèle « 'Continents' » Orchidée ('Organising Carbon and Hydrology In Dynamic Ecosystems') de l'IPSL (qui représente l'humidité du sol et ses interactions avec l'atmosphère par l'intermédiaire des plantes, les nappes d'eau souterraine et l'écoulement des eaux de surface vers les océans), et des développements du modèle « 'Oceans' », qui est à la charge d'un consortium européen NEMO (Nucleus for European Modelling of the Ocean). Par ailleurs, le LMDz continue à être utilisé comme modèle à part entière, pour des tâches particulières. Il réalise des calculs de distribution des gaz à effet de serre à longue durée de vie (CO_2, CH_4, N_2O) dans l'atmosphère, et de leur évolution, ainsi que de la chimie de l'ozone troposphérique en phase gazeuse et des différents types d'aérosols. Parfois, les simulations sont faites sans lien direct avec l'estimation du CC à venir (voir le *Site du LSCE*, 2014, http://www-lsceinca.cea.fr (10/03/2014)). Précisons pour finir que, pour chaque modèle, il

existe toujours plusieurs versions, afin de pouvoir répondre de manière optimale à une question précise.[463]

Dernier point. La plupart des CCM, qui sont des modèles globaux, sont principalement utilisés pour estimer des phénomènes globaux : le changement climatique ; les impacts de ce changement sur la couche d'ozone ; la perturbation des cycles biogéochimiques globaux. Toutefois, une nouvelle "application" a occupé une place croissante dans les pratiques de modélisation par CCM à partir de la fin des années 2000 : l'estimation des liens entre CC et pollution régionale, par le biais de la technique de « *'downscaling'* ». Dans son glossaire, le rapport du GIEC de 2007 définit le 'downscaling' comme « une méthode, qui dérive les informations à échelle locale et régionale (de 10 à 100 km) de modèles à grande échelle et d'analyses de données ». Elle est réalisée, soit à l'aide d'une « méthode dynamique, qui utilise les sorties de modèles climatiques régionaux, de modèles globaux avec une résolution spatiale modulable, ou des modèles globaux à haute résolution », soit grâce à des « méthodes empiriques/statistiques, qui développent des relations statistiques qui lient les variables atmosphériques à grande échelle avec des variables climatiques locales/régionales ».

Le principal enjeu du « 'downscaling' régional » concerne les « réponses hydrologiques » au changement climatique (les précipitations), et en particulier à des phénomènes climatiques à grande échelle corrélés au réchauffement global tels qu'ENSO (El Niño-Southern Oscillation) [*IPCC (WG I)*, 2007, pp. 944 & 74]. Mais, une littérature sur l'estimation par 'downscaling' des impacts des changements climatiques *sur la chimie atmosphérique régionale* s'étoffe également, qui concerne plus directement les chimistes. Il s'agit *principalement d'estimer l'influence du changement climatique sur les mécanismes de réaction chimique qui contribuent à la mauvaise qualité de l'air à des échelles régionales*. La plupart des études de type ont pour objet les régions très polluées, telles que l'Asie de l'Est ou les mégacités. Les projections sont en général limitées aux deux ou trois décennies à venir (*Cf.* e.g. Lam *et al.*, 2009, "A novel downscaling technique for the linkage of global and regional air quality modeling" ; Trail *et al.*, 2013, "Downscaling a global climate model to simulate climate change over the US and the implication on regional and urban air quality").

[463] Six versions du modèle INCA existent aujourd'hui :
1. CH4 : version avec la chimie gazeuse simplifiée ;
2. NMHC : version avec les hydrocarbures non méthaniques ;
3. CH4_AER : version avec la chimie du méthane et les aérosols ;
4. NMHC_AER : version avec les hydrocarbures non méthaniques et les aérosols ;
5. AER : version avec les aérosols et une chimie fixée ;
6. GES : version avec les traceurs inertes et une chimie fixée. [*Site du LSCE*, 2014, http://www-lsceinca.cea.fr/doc.html (10/03/2014)]

1990. Le GIEC dresse une liste des rétroactions connues entre chimie et changement climatique

Dès leur premier rapport de 1990 (FAR, 'First Assessment Report'), les experts scientifiques du 'WG I' du GIEC posent les fondations d'un programme de recherche sur les rétroactions entre chimie atmosphérique et changement climatique. Ils énoncent trois questions :

(i) Dans quelle mesure les gaz à effet de serre et les aérosols sont-ils affectés chimiquement lors de leur séjour dans la troposphère ?;

(ii) En retour, le changement climatique en cours modifie-t-il la chimie troposphérique de manière significative. Et, plus précisément, quel effet le changement climatique a-t-il sur les gaz et les aérosols qui ont un impact sur le climat ?;

(iii) Quelles émissions perturbent la chimie stratosphérique, donc les taux d'ozone et de vapeur d'eau stratosphériques, donc, rétroactivement, le climat global ? (voir Tableau 5 ci-dessous)

Gas	Greenhouse Gas	Is its tropospheric concentration affected by chemistry?	Effects on tropospheric chemistry? *	Effects on * stratospheric chemistry?
CO_2	Yes	No	No	Yes, affects O_3 (see text)
CH_4	Yes	Yes, reacts with OH	Yes, affects OH, O_3 and CO_2	Yes, affects O_3 and H_2O
CO	Yes, but weak	Yes, reacts with OH	Yes, affects OH, O_3 and CO_2	Not significantly
N_2O	Yes	No	No	Yes, affects O_3
NOx	Yes	Yes, reacts with OH	Yes, affects OH and O_3	Yes, affects O_3
CFC-11	Yes	No	No	Yes, affects O_3
CFC-12	Yes	No	No	Yes, affects O_3
CFC-113	Yes	No	No	Yes, affects O_3
HCFC-22	Yes	Yes, reacts with OH	No	Yes, affects O_3
CH_3CCl_3	Yes	Yes, reacts with OH	No	Yes, affects O_3
CF_2ClBr	Yes	Yes, photolysis	No	Yes, affects O_3
CF_3Br	Yes	No	No	Yes, affects O_3
SO_2	Yes, but weak	Yes, reacts with OH	Yes, increases aerosols	Yes, increases aerosols
CH_3SCH_3	Yes, but weak	Yes, reacts with OH	Source of SO_2	Not significantly
CS_2	Yes, but weak	Yes, reacts with OH	Source of COS	Yes, increases aerosols
COS	Yes, but weak	Yes, reacts with OH	Not significant	Yes, increases aerosols
O_3	Yes	Yes	Yes	Yes

* - Effects on atmospheric chemistry are limited to effects on constituents having a significant influence on climate

Tableau 5 : Chimie atmosphérique pertinente dans la science du changement climatique, d'après le Premier rapport du GIEC
[*IPCC (WG I)*, 1990, WGI, « Table 2.1, d'après Wuebbles *et al*., 1989 », p. 50]

Dans le FAR, aucune mention n'est faite d'un modèle de circulation générale (GCM, 'Global Circulation Model') qui aurait été couplé à un modèle de chimie. Quant aux résultats des modèles de chimie-transport (CTM) utilisés indépendamment des GCM, ils pourraient donner des indications sur la formation, et donc le forçage radiatif, de certains polluants secondaires ; toutefois, ils sont eux-mêmes presque totalement absents du FAR. « Les

évaluations du forçage radiatif résultant des changements de concentrations d'ozone stratosphérique (comme résultante d'émissions de CFC, N_2O et CH_4) n'ont pas été incluses à cause d'un temps trop limité pour entreprendre les analyses », se justifient les auteurs. En effet, précisent-ils, les « modèles de chimie troposphérique donnent [à ce stade] des résultats très divergents, du fait de leur résolution spatiale limitée. Or, les impacts radiatifs des changements d'ozone troposphérique, notamment, dépendent fortement de leur distribution spatiale. En corollaire, les valeurs de GWP pour les gaz à effet de serre secondaires, [par exemple,] ont été produites uniquement à l'aide d'approximations au premier ordre, en utilisant les résultats d'un modèle de chimie atmosphérique globale, troposphérique et à deux dimensions, et les forçages radiatifs [recensés par] Derwent, 1990. » [*IPCC (WG I)*, 1990, p. 59]

Les réactions chimiques atmosphériques ne font pas non plus l'objet de *paramétrisations dans les modèles 3-D*. Elles ne sont pas même inscrites au rang des développements et améliorations des paramétrisations à effectuer dans un avenir proche, par le biais de campagnes de mesures atmosphériques. Les auteurs préfèrent insister sur l'urgence à élaborer des paramétrisations pour les nuages, pour les flux de chaleur turbulents et convectifs dans la couche limite (atmosphérique) planétaire,[464] et pour le transfert de chaleur et d'eau à l'intérieur des sols [*IPCC (WG I)*, 1990, pp. xxxiii & 85]. Des paramétrisations de chimie seront, en fait, développées pour les modèles du rapport suivant du GIEC, non sans difficulté [*IPCC (WG I)*, 1995, p. 506]. Nous n'avons pas consacré de travail à cet aspect, mais nous sommes focalisé sur la modélisation "hors paramétrisation", c'est-à-dire l'intégration des équations chimiques à l'échelle de la maille du modèle.

1995. Les premiers résultats de modèles de chimie-transport globaux 3-D

Les experts du premier rapport du GIEC reconnaissent que « des expériences réalistes de changement climatique requerraient un couplage des OGCMs ('Oceanic Global Circulation Models') et des AGCMs ('Atmospheric Global Circulation Models') » ; or, déplorent-ils, de tels couplages globaux et à trois dimensions restent rares en 1990. De plus, « aucun couplage du cycle du carbone à un AGCM-OGCM n'a encore été entrepris » [*IPCC (WG I)*, 1990, p. 87]. En 1995, les experts du second rapport du GIEC (SAR, 'Second Assessment Report') peuvent par contre se vanter de présenter des résultats d'AOGCM ('Atmosphere-Ocean General

[464] La couche limite (atmosphérique) planétaire est la partie la plus basse de l'atmosphère, dont les propriétés dépendent fortement des phénomènes de surface. Selon la vitesse du vent, la rugosité des sols ou encore l'ensoleillement, l'épaisseur de la couche limite planétaire peut varier de 100 mètres à 2000 mètres environ.

Circulation Models').[465] « Dans bien des cas, affirment-ils, les GCMs de l'atmosphère et des océans, développés comme des modèles séparés, sont combinés, pour donner un GCM *couplé* ». En revanche, la modélisation du cycle global du carbone dans les GCM donne des résultats encore trop divergents ; seuls quelques essais de modélisation des « pompes biologiques » à CO_2, océaniques et terrestres, ont été entrepris [*IPCC (WG I)*, 1995, pp. 31, 289 & 348-349]. De plus, pas plus que dans le premier rapport, l'impact du changement climatique en cours sur la chimie atmosphérique n'est modélisé.

En revanche, des modèles de chimie-transport globaux de la troposphère font leur apparition dans le SAR. Avant de s'ingénier à modéliser l'influence du changement climatique sur les mécanismes chimiques atmosphériques, les scientifiques du GIEC veulent avant tout estimer dans quelle mesure les réactions chimiques ayant lieu dans l'atmosphère altèrent le temps de résidence des gaz à effet de serre et des aérosols. A ce stade, les scientifiques du changement climatique ne peuvent que constater les larges incertitudes qui affectent leurs valeurs sur l'impact radiatif présent de ces composés atmosphériques (*cf.* les grandes barres d'erreur de la Figure 45 ci-dessous). Estimer les variations de leurs concentrations dans l'avenir, selon plusieurs scénarii d'émissions, comme le veut le GIEC, relève encore de la gageure. Les auteurs du SAR effectuent néanmoins de premier pas dans cette direction.

[465] L'océan joue un rôle primordial dans la redistribution de la chaleur atmosphérique. Les processus de circulation des océans, plus longs que ceux de l'atmosphère, ont une influence essentielle sur le climat à moyen et long terme. En outre, les océanographes, au premier rang desquels Roger Revelle, ont été impliqué dans la science du climat dès les années 1950. En 1956, on retrouve ainsi Revelle aux côtés du géophysicien et aéronome Lloyd Berkner et les modélisateurs-atmosphériciens Rossby, Charney et Neumann, au sein du 'National Research Council Committee on Meteorology' créé par la NAS, qui décidera la création du NCAR (en 1960). Bien sûr, à l'époque, le CC demeure une question très secondaire. Si les scientifiques de Princeton s'étaient ingéniés à développer de premiers « modèles de circulation générale », les GCM, au début des années 1950, c'est principalement parce qu'ils avaient pris conscience que l'amélioration de la prévision du temps passerait notamment par une meilleure compréhension des mécanismes généraux du climat (sans parler des applications militaires des modélisations à grande échelle) (voir Chapitre 2). Il n'en demeure pas moins que les GCM, ou plutôt les 'Atmospheric GCM', AGCM, deviendront les premiers modèles de prévision du CC. Et que les océanographes chercheront bientôt à élaborer leurs modèles globaux, les 'Oceanic GCM', OGCM, et à les coupler aux AGCM. Il faudra toutefois attendre le début des années 1990 pour voir, aux Etats-Unis, de premiers modèles globaux d'océan, à trois dimensions, et basés sur les équations de la dynamique des fluides (comme les AGCM), couplés à des AGCM.

Ce couplage, dont résulta les AOGCM, fut le premier couplage numérique global de la science du CC. Ont suivi, depuis, des couplages entre AGCM, ou AOGCM, et modèles de végétation, de cycles biogéochimiques, de biologie océanique, *etc*… et, donc, de chimie atmosphérique. [Guillemot, 2007 (b), pp. 105-109 & 95 ; Hart & Victor, 1993]

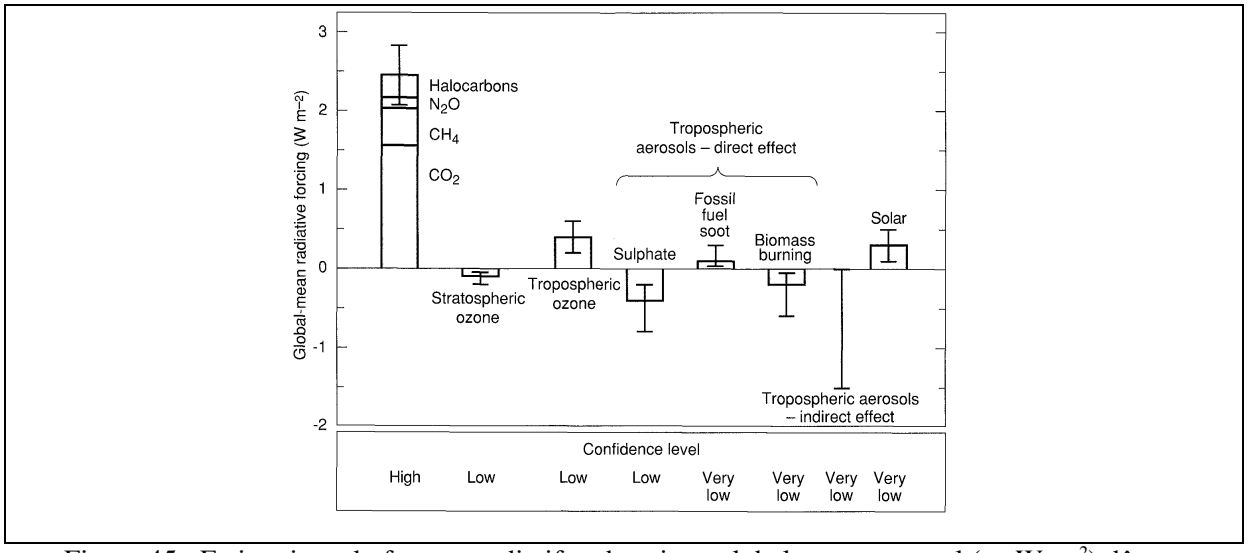


Figure 45 : Estimations du forçage radiatif anthropique global moyen annuel (en W.m^{-2}) dû aux changements de concentrations en gaz à effet de serre et aérosols, ainsi qu'aux modifications naturelles de production solaire, entre 1850 et 1995 (avec les barres d'erreurs associées) [*IPCC (WG I)*, 1995, p. 117]

Le peu d'intérêt pour la chimie stratosphérique

Comme nous l'avons dit dans le Chapitre 7, on va retrouver dans le GIEC d'anciennes figures de la science de la destruction de la couche d'ozone. Et, les auteurs du SAR discutent quelques rétroactions entre ozone stratosphérique et climat. Ils prennent soin de montrer que le programme ONU/ICSU nommé SPARC ('Stratospheric Processes And their Role in Climate')[466], débuté en 1992, est fructueux. Toutefois, comme l'indique clairement la Figure 45, l'ozone stratosphérique ne joue pas un rôle radiatif central. En fait, dans le SAR et ses successeurs, l'attention portera autant sur la vapeur d'eau stratosphérique que sur l'ozone stratosphérique (les deux étant, en outre, corrélés, comme nous l'avons dit dès le Chapitre 1). Mais surtout, ajoutent les auteurs du SAR, « les impacts de la destruction d'ozone sur les autres espèces radiatives actives [souffrent de] grandes incertitudes ». [*IPCC (WG I)*, 1995, pp. 110-111]

En fait, il faudra attendre le cinquième rapport, publié en 2014, pour voir une partie des modèles recensés par le GIEC intégrer des modèles de chimie de l'ozone stratosphérique qui prendront en compte « les variations de l'ozone stratosphérique au cours du temps » en « traitant la chimie stratosphérique de manière interactive » [*IPCC (WG I)*, 2014, 9.14]. Comprendre : des modèles qui intégreront les interactions et rétroactions de l'ozone stratosphérique avec les autres composés chimiques atmosphériques et avec le climat. On voit par là que la connaissance des impacts des variations de l'ozone stratosphérique sur le

[466] L'acronyme, demeuré identique, désignera ensuite le programme 'Stratosphere-troposphere Processes And their Role in Climate'.

climat, dont rendent compte les rapports du GIEC, est moins impérieuse que la prise en compte des impacts du changement climatique sur le rétablissement de la couche d'ozone, dont font état, de manière croissante, les 'Assessments of Ozone Depletion', comme nous l'avons dit dans le Sous-chapitre 8.2.

MOGUNTIA, un modèle global 3-D germano-suédois intégrant une chimie du SO_2 en phase gazeuse et en phase aqueuse

La Figure 45 indique, par contre, que l'effet radiatif direct des aérosols mérite d'être étudié.[467] Les aérosols soufrés, en particulier. Or, signalent les auteurs du SAR, « de récentes simulations climatiques couplées […] ont inclus les effets directs des aérosols soufrés, en plus des changements de niveau des concentrations de dioxyde de carbone ». Parmi ces modèles, celui développé par une équipe de chercheurs états-uniens, avec à sa tête deux modélisateurs du 'Lawrence Livermore National Laboratory', B.D. Santer et K.E. Taylor (Santer *et al.*, 1995(a), "Towards the detection and attribution of an anthropogenic effect on climate", *Clim. Dyn.*). Une version ultérieure du modèle de Santer et ses collègues s'est même essayée à une modélisation en trois dimensions, qui intégre des mécanismes chimiques supplémentaires, y compris les effets d'une réduction d'ozone stratosphérique (Santer *et al.*,

---

[467] En revanche, au milieu des années 1990, l'estimation de l'effet radiatif *indirect* des aérosols semble hors de portée des scientifiques (voir Figure T).

Pour le lecteur non initié, nous reproduisons ci-dessous une introduction à la science des aérosols par les membres de l'Equipe aérosols du Laboratoire d'Optique Atmosphérique (LOA) de Lille :

> « Dans la stratosphère, les aérosols sont rares mais ils peuvent résider plusieurs années. Dans la basse troposphère, où ils ont en général beaucoup plus abondants, les aérosols séjournent quelques jours seulement, cette durée variant essentiellement selon les précipitations. Il en résulte que, contrairement aux gaz à effet de serre, la concentration des aérosols peut varier de plusieurs ordres de grandeur à de courtes échelles temporelles ou spatiales. Les aérosols peuvent être chimiquement actifs et leurs propriétés évoluent au cours de leur transport dans l'atmosphère. Ils peuvent jouer un rôle dans la création ou la destruction d'espèces gazeuses, dont l'ozone, en catalysant à leur surface des réactions chimiques.
>
> « En diffusant et absorbant la lumière ou en modifiant le pouvoir réfléchissant des nuages, les aérosols exercent plusieurs effets sur le climat de la Terre. On a l'habitude de cataloguer ces effets en effet direct, semi-direct, et indirect. L'effet direct, aussi appelé « effet parasol », réside dans la diffusion du rayonnement solaire par les particules, et conduit à un refroidissement du système climatique, sauf dans le cas d'aérosols absorbants au-dessus d'une surface très réfléchissante. Les aérosols, en absorbant de façon plus ou moins importante le rayonnement solaire, modifient également le profil vertical de température et ont, par conséquent, un impact sur les conditions de formation des nuages, en entraînant leur disparition ou modifiant leur extension géographique. Ce second effet est appelé effet semi-direct. L'effet indirect des aérosols résulte quant à lui des interactions entre aérosols et nuages, qui ont eux-mêmes un impact fort sur le bilan énergétique de la Terre. Ainsi les aérosols peuvent servir de noyaux de condensation lors de la formation des nuages, de sorte qu'à contenu en eau fixé, un nuage issu d'une masse d'air pollué contient un nombre de gouttelettes supérieur à un nuage moins pollué. Bien que les gouttelettes soient plus petites, un tel nuage sera plus réfléchissant que celui issu d'une masse d'air sans aérosols. Cet effet est connu sous la dénomination de premier effet indirect et tend à refroidir le système climatique. Dans un second temps, puisque les gouttelettes sont plus petites, elles n'atteindront pas la taille critique au-delà de laquelle apparaît la précipitation et la durée de vie moyenne du nuage en sera augmentée. La couverture nuageuse moyenne sur la Terre sera donc plus importante. Ces processus constituent le deuxième effet indirect des aérosols sur le climat, qui peut être refroidissant ou réchauffant, notamment selon l'altitude du nuage. Il subsiste de grandes incertitudes sur l'évaluation quantitative de ces effets sur le bilan radiatif de notre planète.
>
> « La composition chimique, la distribution spatiale, verticale et temporelle, mais aussi les caractéristiques microphysiques (distributions en taille et formes) des aérosols sont les paramètres essentiels pour l'estimation de leur impact radiatif. Leur détermination à l'échelle globale, tout comme leur suivi temporel sont donc nécessaires. Des informations fiables sur les aérosols sont aussi nécessaires pour des applications autres que l'étude du système climatique. Par exemple, l'alerte précise et à temps de la présence de panaches d'aérosols (soulèvement de poussières désertiques, fortes éruptions volcaniques, déforestation) est importante pour l'aviation. De même les aérosols sont responsables des épisodes de pollution particulaire ayant des répercussions sur la qualité de l'air, et par conséquent sur la santé humaine. » [http://www-loa.univ-lille1.fr/recherche/Aerosols/fr/(06/03/2014)]

1995(b), "A search for human influences on the thermal structure of the atmosphere", rapport du Lawrence Livermore *PCMDI* n° 27). Nous y reviendrons dans la section suivante.

Si l'on met de côté ces publications des chercheurs du LLNL contemporaines de la rédaction du deuxième rapport du GIEC, « la plupart des estimations du forçage radiatif dû aux aérosols soufrés anthropiques » dudit rapport sont basées sur des études européennes. Ces études ont été réalisées dans la lignée des calculs des Suédois Joakim Langner et Henning Rodhe, à l'aide de leur modèle développé pour le 'Max-Planck Institute for Meteorology' de Mainz en Allemagne : le MPI-Mainz MOGUNTIA. MOGUNTIA est l'acronyme pour « MOdel of the General UNiversal Tracer transport In the Atmosphere ». MPI est le sigle du 'Max-Planck Institute'. Dans le cadre de leur étude, qui visait à ajouter une troisième dimension à leur précédent modèle (latitude-altitude) développé une dizaine d'années plus tôt, Rodhe et Langner s'étaient rendus au Max-Planck Institut für Chemie (Mainz), où Peter Zimmermann and Paul Crutzen les avaient invités à réaliser quelques "runs" (« simulations numériques ») à l'aide de leur modèle de simulation de la dynamique troposphérique. Les deux chercheurs du Département de Météorologie de l'Université de Stockholm s'étaient ensuite servis de cette expérience allemande pour améliorer leur « modèle de transport Eulérien » MOGUNTIA. En ajoutant une troisième dimension à leur modèle de simulation des aérosols soufrés, « la longitude », Langner et Rodhe avaient abouti à un « modèle tridimensionnel global du cycle du soufre troposphérique » (titre de leur article de 1991, publié dans *J. Atmos. Chem.*). Il sera le premier modèle de chimie-transport à trois dimensions cité dans un rapport du GIEC.[468]

---

[468] Dans leur article "A global three-dimensional model of the tropospheric sulfur cycle" (1991, *J. Atmos. Chem.*), Langner et Rodhe résument ainsi leurs travaux et leurs résultats :

> "The model treats the emission, transport, chemistry, and removal processes for three sulfur components; DMS (dimethyl sulfide), SO_2 and SO_4^{2-} (sulfate). These processes are resolved using an Eulerian transport model, the MOGUNTIA model, with a horizontal resolution of 10° longitude by 10° latitude and with 10 layers in the vertical between the surface and 100 hPa [(~altitude: 16km, therefore below the Junge layer ~25km)]. Advection takes place by climatological monthly mean winds. Transport processes occurring on smaller space and time scales are parameterized as eddy diffusion except for transport in deep convective clouds which is treated separately. The simulations are broadly consistent with observations of concentrations in air and precipitation in and over polluted regions in Europe and North America. Oxidation of DMS by OH radicals together with a global emission of 16 Tg DMS-S yr^{-1} from the oceans result in DMS concentrations consistent with observations in the marine boundary layer. The average turn-over times were estimated to be 3, 1.2-1.8, and 3.2-6.1 days for DMS, SO_2, and SO_4^{2-} respectively. […]
>
> "A previous attempt to use a global transport model to estimate the distribution of sulfur compounds in the troposphere was presented by Rodhe and Isaksen (1980) using a two-dimensional (latitude-height) model. The present study is an extension of their work to three-dimensionstaking into account new knowledge of the processes governing the transport, transformation, and deposition of sulfur species in the troposphere together with recent information on the magnitude and distribution of natural sources of sulfur compounds. Recently, Erickson et al. (1990) have presented a global three-dimensional model treating sulfur species emphasizing the potential for production of condensation nuclei from marine and anthropogenic sulfur emissions. […]
>
> "We gratefully acknowledge the contributions from Peter Zimmermann and Paul Crutzen, for allowing us to use the transport model developed at the Max-Planck Institut für Chemie in Mainz, access to the OH fields, comments on this manuscript, and fruitful cooperation. We benefited from discussions with Jos Lelieveld, Maria Kanakidou, Kim Holmkn, and, among others, the participants in the GLOMAC project. The manuscript was improved by the suggestions from two anonymous referees. Much of the programming work was carried out by Ulf Hansson, never complaining about numerous changes. This study was part of the EUROTRAC subproject GLOMAC and was sponsored by the Swedish National Environment Protection Board under contracts 601-4004-87 and 611-681-89." [Langner & Rodhe, 1991, pp. 225, 226 & 258]

Les processus chimiques que modélisent Langner et Rodhe demeurent toutefois très limités. Quels sont-ils ? Premièrement, « une chimie en phase gazeuse » peu complexe, qui se décline, d'une part, en une réaction en trois étapes où le SO_2 réagit avec les radicaux OH pour produire de l'acide sulfurique (H_2SO_4) ; et, d'autre part, en une chimie du diméthylsulfure (DMS), dont les auteurs n'ont conservé que son oxydation par le radical OH (avec pour valeurs des concentrations en OH, celles employées par Crutzen et Zimmerman dans leurs modélisations effectuées au cours de la même année 1991). Deuxièmement, une « oxydation en phase aqueuse », c'est-à-dire une réaction chimique se produisant à l'intérieur du nuage, où « le SO_2 peut être rapidement oxydé en SO_4^{2-} ». En fait, la « rapidité » du processus est alors mal connue par Rodhe et Langner, qui décident de réaliser deux simulations distinctes, l'une avec une oxydation immédiate du SO_2 (cas « standard »), l'autre avec une oxydation limitée (avec, « choisie de manière plutôt arbitraire », confessent-ils, une durée de vie moyenne du SO_2 dans les nuages limitée à 10 heures). Pour finir, les auteurs font part de leur désir de réaliser, « dans le futur, des simulations qui rendraient les réactions en phase aqueuse explicitement dépendantes des concentrations ambiantes en H_2O_2 et O_3. » [Langner & Rodhe, 1991, pp. 230-233 ; *IPCC (WG I)*, 1995, p. 105]

Outre le fait qu'il ne prend pas en compte les effets du changement climatique sur la chimie atmosphérique, le modèle MOGUNTIA montre une autre limite. S'il peut bel et bien être qualifié de modèle de circulation générale intégrant la chimie (mais un GCM sans cycle du carbone, donc incapable de modéliser efficacement le changement climatique), le MOGUNTIA de 1991 ne satisfait pas aux exigences de résolution des meilleurs GCM du milieu des années 1990, sur lesquels s'appuie le SAR. En effet, les auteurs du rapport décrivent les GCM comme suit :

> « Les CCM sont basés sur des lois physiques qui décrivent les dynamiques et la physique atmosphérique et océanique, et sur des relations empiriques, ainsi que leurs représentations en équations mathématiques. Ces équations sont résolues numériquement avec des ordinateurs qui utilisent des grilles à trois dimensions recouvrant le globe. Pour le climat, dans les GCM atmosphériques, les résolutions typiques sont 250 km environ horizontalement, et 1 km verticalement, souvent avec des résolutions verticales plus fines pour les régions plus proches de la surface, et des résolutions moins fines dans la haute troposphère et dans la stratosphère. De nombreux processus physiques, tels que ceux relatifs aux nuages, se déroulent à des échelles spatiales beaucoup plus faibles [... et doivent être] paramétrisés. » [*IPCC (WG I)*, 1995, p. 31]

Or, la résolution horizontale de MOGUNTIA est égale à "10° longitude / 10° latitude". Sachant que, par exemple, 10° de longitude aux latitudes moyennes équivaut à 800km environ, et 10° de latitude aux longitudes moyennes correspond à 1100km environ, la résolution du modèle est donc plus grossière que les "250km horizontaux" préconisés. En

revanche, la résolution verticale de MOGUNTIA, 16km divisés en 10, est proche du kilomètre vertical des GCM utilisés dans le TAR. De plus, les temporalités des modélisations d'évolution de la distribution des aérosols soufrés qu'utilisent Langner et Rodhe en 1991, qui sont supérieures ou égales à un mois, sont comparables à celles des GCM du GIEC [Langner & Rodhe, 1991, pp. 225 & 227]… Le chemin qui reste à parcourir vers des GCM intégrant la chimie du soufre ne semble donc plus très long. Pour atteindre les exigences du GIEC, il reste "simplement" à développer des GCM plus complets (avec les effets du CO_2, *etc.*), et aux mailles plus fines.

Entre 1991 et 1995, de nombreux développeurs européens de modèles de simulation du forçage radiatif des aérosols soufrés s'appuient sur l'expérience primitive de MOGUNTIA.[469] En particulier, suite logique des choses, au Max-Planck, où l'équipe de Hasselmann génère pour le SAR des distributions spatiales de la concentration en aérosols soufrés dérivées directement du modèle MOGUNTIA de Langner et Rohde (Hasselmann *et al.*, 1995, "Detection of anthropogenic climate change using a fingerprint method", *Max-Planck Institute for Meteorology, Report No. 168*). Toutefois, le modèle couplé « GCM » qui en résulte inclut « seulement l'effet direct des aérosols soufrés (représenté par une augmentation de l'albedo de surface). »[470] [*IPCC (WG I)*, 1995, pp. 274, 431, 418, 105, 111-112, 295 & "8.4.2.3. Combined CO_2 and sulphate aerosols signals"]

Dans quelle tradition de recherche ces modélisateurs s'inscrivent-ils ? Parmi les collaborateurs du rapport du 'Max-Planck Institute for Meteorology' que nous venons de citer (Hasselmann *et al.*, 1995), on retrouve de nouveau le météorologiste suédois Henning Rodhe, qui mérite que nous nous attardions sur son cas. Collègue de P. Crutzen au Département de Météorologie de l'Université de Stockholm entre 1968 et 1972, Rodhe ne collabore guère à l'époque avec le Néerlandais, qui s'est orienté vers l'aéronomie. Il coopère par contre avec Bert Bolin, alors directeur du Département de Météorologie, avec lequel il publie un article en 1973 ("A note on the concepts of age distribution and transit time in natural reservoirs", *Tellus*). Mais surtout, Rodhe co-signe quelques années plus tard des

[469] Les Etats-Uniens William F. Cooke et Julian J.N. Wilson (1996, "A global black carbon aerosol model", *J. Geophys. Res.*) basent en outre leur modèle de simulation du forçage du carbone suie sur le MOGUNTIA de Langner & Rodhe, 1991.

[470] Le SAR évoque toutefois de premiers travaux de modélisations sur les effets indirects des aérosols soufrés. Premièrement, il cite Erickson, D.J., R.J. Oglesby and S. Marshall, 1995, "Climate response to indirect anthropogenic sulfate forcing", *Geophys. Res. Lett, 22,* pp. 2017-2020. Deuxièmement, il rapporte que Boucher et Lohmann (1995) ont utilisé deux GCM, un « LMD » (pour Laboratoire de Météorologie Dynamique du CNRS), et un « ECHAM », afin d'estimer l'effet indirect des aérosols soufrés anthropiques sur l'albedo nuageuse, en reliant la charge en aérosols soufrés à la concentration de gouttes nuageuses. Ils ont repris pour leurs modélisations la distribution d'aérosols soufrés "standard" calculée par le modèle MOGUNTIA de Langner & Rodhe, 1991. Entre temps, une « climatologie nouvelle des sulfates » avait été développée, qui prenait en compte les « oxydations lentes dues sulfates » (ce qui conduisait à des résultats d'oxydation moindre du SO_2 dans les nuages, et donc à une charge en sulfate moindre dans les nuages, que ce qu'avait estimé Langner & Rodhe, 1991). [*IPCC (WG I)*, 1995, p. 114 & 112]

articles précoces sur le soufre atmosphérique avec le norvégien de l'Université d'Oslo Ivar S.A. Isaksen (1978, "A two-dimensional model for the global distribution of gases and aerosol particles in the troposphere", Report AC-47, International Meteorological Institute in Stockholm/ Department of Meteorology, University of Stockholm, 36 pages ; 1980, "Global distribution of sulfur compounds in the troposphere estimated in a height/latitude transport model", *J. Geophys. Res*).

Comme nous l'avons montré dans le Sous-chapitre 3.2, dès la fin des années 1960, la recherche scandinave sur le soufre atmosphérique s'est faite en partie en lien avec l'expertise sur les pluies acides. Les pays scandinaves, victimes des pollutions en provenance de l'Europe de l'Ouest, du Royaume-Uni principalement, ont alors pu compter sur une tradition déjà longue d'étude météorologique. Les études sur les pluies acides, effectuées dans le cadre de la 'Convention on Long-Range Transboundary Air Pollution' (LRTAP, signée à Genève en 1979) ont stimulé les études sur les émissions soufrées, qui en étaient partiellement responsables. A partir des années 1970, les études sur les précipitations acides ont évolué vers une échelle continentale, en Europe et en Amérique du nord, d'abord, puis en Asie de l'Est dans les années 1990, avant d'atteindre finalement l'échelle transcontinentale (notamment grâce à l'apport des satellites, dont l'utilisation a été étendue dans les années 1990 à la quasi-totalité des programmes internationaux sur l'atmosphère et l'environnement). Il en a notamment résulté l'établissement en 2005 d'une 'Task Force on Hemispheric Transport of Air Pollution (TF HTAP)' sous les auspices de la Convention LRTAP. Rappelons, à toutes fins utiles, que les études sur le dioxyde de soufre (tout comme, plus généralement, les études du LRTAP) ne visaient pas uniquement à désigner les responsables des pluies acides, mais également ceux de smog (les évènements de smog soufré de Londres de 1952, 1956, 1957 et 1962 sont restés célèbres, et les politiques primitives de l'US EPA, dans les années 1970, seront pour une part importante destinées à faire décliner les concentrations de SO_2 atmosphérique).

Les balbutiements de la modélisation globale de la chimie de l'ozone troposphérique et du méthane

Dans la mesure où le méthane et l'ozone troposphérique sont deux puissants gaz à effet de serre (voir Figure 45, plus haut), la photochimie troposphérique couplée de l'ozone, du méthane, du radical OH, des NO_x, du monoxyde de carbone, *etc.* constitue le deuxième grand enjeu de la modélisation de la chimie atmosphérique pour la science du changement climatique (après les effets climatiques des aérosols et du SO_2 dont nous venons de parler). Au milieu des années 1990, les grandes lignes de ce schème réactionnel complexe n'ont guère évolué par rapport au début des années 1980 (voir le « cycle réactionnel des radicaux OH »

qu'avait proposé Ehhalt pour le rapport SCOPE de 1981 ; Figure 33 de notre Chapitre 6). Pourtant, la modélisation de cette photochimie demeure périlleuse, en particulier à l'échelle globale. En 1995, aucun des deux programmes internationaux d'étude sur la modélisation globale de la photochimie de l'ozone et du méthane, lancés en 1994 dans l'optique de la rédaction du SAR, n'a encore donné de résultats satisfaisants.

Le premier programme, baptisé PhotoComp (tropospheric Photochemical model interComparison), réalise une comparaison de modèles 0-D ('box models') simulant la photochimie de l'ozone. PhotoComp n'est pas mentionné nommément dans le SAR. Son rapport final ne sera pas publié avant 1997, dans le *Journal of Geophysical Research*. On trouve parmi les auteurs du texte certains des responsables de la partie chimie de l'ozone dans le troisième rapport du GIEC de 2001 : Michael Prather (Irvine), Terje Berntsen (Oslo), Richard Derwent (Met Office, R-U), Larry Horowitz (Harvard) [Olson *et al.*, 1997]. Le second programme répond au nom de Delta-CH4. La chimie du méthane étant couplée à celle de l'ozone, les deux programmes ne sont pas étrangers, et on retrouve des modèles des mêmes laboratoires dans les deux programmes. Dans Delta-CH4, toutefois, les modèles intercomparés ne sont plus de simples 'box models' mais des modèles à deux ou trois dimensions. En contrepartie, la chimie est moins complexe. Il importe en premier lieu de développer des modèles capables d'intégrer les rétroactions du méthane sur la chimie troposphérique. En fait, le méthane, qui a un temps de vie atmosphérique moyen d'une dizaine d'années, joue un rôle important dans la chimie troposphérique mais aussi stratosphérique. Dans la troposphère, il est considéré comme un gaz précurseur de l'ozone (en présence d'oxydes d'azote, NO_x). Dans la stratosphère, l'oxydation du méthane est la principale source de vapeur d'eau ; et, par voie de conséquence, le principal précurseur de radicaux OH, qui intervient dans la chimie stratosphérique (de la même manière qu'il participe à la chimie troposphérique). [*IPCC (WG I)*, 1995]

En fin de compte, vingt-trois groupes de modèles ont été soumis à PhotoComp, et huit groupes de modèles à Delta-CH4. S'ils n'ont pas permis d'intégrer la chimie de l'ozone et du méthane dans les GCM du SAR, ils ont toutefois abouti à « un consensus sur la rétroaction du méthane » suffisant pour utiliser dans le SAR « une augmentation de l'O_3 troposphérique uniquement imputée au CH_4 » (en revanche, « aucun consensus » n'émergea sur les prédictions futures de changement d'O_3 et d'OH). PhotoComp et Delta-CH4 ont en outre permis d'élaborer de premiers tests standard permettant de sélectionner les modèles de photochimie du rapport du GIEC suivant (2001).

Entre temps, de nouveaux modèles de chimie-transport 3-D globaux auraient été proposés. En 1999, un nouveau programme d'intercomparaison sera lancé, qui intégrera les objectifs de PhotoComp et Delta-CH4, et les dépassera. Il s'agira d'OxComp (tropospheric

OXidant model COMParison), le programme d'intercomparaison des modèles de chimie troposphérique globale 3-D, qui accouchera de l'ossature des résultats du « Chapitre 4. Chimie atmosphérique et gaz à effet de serre » du troisième rapport du GIEC (2001). [*IPCC (WG I)*, 2001, p. 267]

2001. Les premiers modèles globaux de photochimie troposphérique (O_3, OH, NO_x, CO)

Le programme d'intercomparaison du Workshop OxComp (1999)

Les résultats de modélisation de la chimie dans le SAR se limitent à de « premières intégrations AOGCM qui incluent, et encore *très sommairement*, les *effets* des aérosols troposphériques » soufrés ; et encore : « seulement leurs effets *directs (nous soulignons)* ». Les chimistes de l'atmosphère ne comptent pas en rester là, mais occuper une place plus importante dans le rapport du GIEC suivant. Les auteurs du SAR écrivent :

> « A ce jour, aucune expérience AOGCM n'a étudié les effets des changements climatiques sur la chimie troposphérique, bien que de nombreuses institutions projettent de le faire dans un avenir proche. Le principal problème tient dans la manière d'inclure des modèles de chimie troposphérique, complexes et de grande taille, dans des modèles atmosphère-océan déjà complexes et de très grande taille. [...] La plupart des efforts à court terme seront consacrés à inclure les sulfates, les poussières [(les aérosols)] et l'ozone dans les AOGCM. En ce qui concerne les poussières et les sulfates, il est important de prédire, non seulement leur distribution mais leur taille. Pour l'ozone il est important de prédire, non seulement la distribution horizontale mais, plus important, la distribution verticale. [...] L'inclusion du méthane et de l'ozone dans des modèles de climat complexes représentera un défi majeur, et impliquera le couplage des GCM à des modèles de chimie réactive troposphérique. » [*IPCC (WG I)*, 1995, p. 349]

En fait, les auteurs du troisième rapport du GIEC (TAR, 'Third Assessment Report' ; 2001) se trouvent aussi impuissants à présenter des résultats de modélisations couplées CTM-(AO)GCM (avec rétroactions chimie-climat) que leurs prédécesseurs. Mais, alors que les auteurs du SAR se contentent de conclure que « des CTM ont pu montrer indépendamment un impact des changements d'émissions de NO_x et de CO sur l'abondance des OH et CH_4 globaux, mais sans qu'aucun consensus sur les futurs changements d'O_3 et d'OH n'existe », les simulations de la photochimie troposphérique prises en compte dans le TAR sont autrement plus fructueuses [*IPCC (WG I)*, 2001, p. 267].

En vue de sa rédaction, la modélisation globale de l'ozone troposphérique, des radicaux OH et du méthane, en particulier, a été mise au centre des attentions des chimistes de l'atmosphère. D'abord, l'ozone troposphérique contribue de manière directe à l'effet de serre. Les auteurs du TAR estiment que « l'augmentation de l'O_3 troposphérique a produit la

troisième plus grande augmentation de forçage radiatif direct de l'époque industrielle » derrière le CO_2 et le CH_4. De plus, l'ozone troposphérique réagit avec le radical OH, qui modifie la durée de vie de certains gaz à effet de serre, dont l'un des plus puissants, le méthane (CH_4) – en fait les variations moyennes globales d'OH et CH_4 peuvent être corrélées de manière assez simple (« le processus de diminution de CH_4 atmosphérique global moyen au cours du temps est dominé par la réaction OH + CH_4 → CH_3 +H_2O dans la troposphère »). Autre point important : les échanges d'ozone entre troposphère et stratosphère sont également à prendre en considération dans toute photochimie troposphérique.[471] [*IPCC (WG I)*, 2001, pp. 260, 248 & 269]

Le « Chapitre 4. Chimie atmosphérique et gaz à effet de serre » du TAR vient couronner *le premier effort de modélisation intégrée (sur la base de scénarios d'émissions projetées dans le futur) de l'ozone troposphérique et de la capacité oxydante de la troposphère* (dont l'action du radical OH, le principal oxydant de la troposphère – OH étant souvent mesuré indirectement grâce au budget de CH_4, avec lequel il réagit). Cet effort a été mené principalement dans le cadre d'une coopération internationale nommée OxComp (tropospheric OXidant model COMParison ; 1999-2000).

OxComp se présente comme une *évaluation de différents modèles de chimie-transport globaux 3-D*, c'est-à-dire comme leur intercomparaison, dans le but de construire un consensus sur les capacités actuelles de modélisation troposphérique à prévoir les changements d'OH et d'O_3 en réponse aux changements des autres émissions. Nous voyons qu'il ne s'agit pas d'intégrer la chimie troposphérique dans les GCM les plus performants ; mais, de réaliser des modélisations indépendantes, où des contraintes (variation de température, concentration de quelques polluants réactifs) sont imposées à des CTM globaux, et si possible tri-dimensionnels. Par ailleurs, et ceci constitue le second but d'OxComp : à défaut de pouvoir proposer des modèles couplés photochimie troposphérique-changement climatique (des CCM, donc), il faut établir des *paramétrisations* qui calculent les concentrations de gaz à effet de serre chimiquement réactifs pour toute la gamme de scénarii d'émissions futures du Rapport spécial SRES ('Special Report on Emissions Scenarios') du GIEC, de 2000, retenus pour le TAR (2001). [*IPCC (WG I)*, 2001, p. 268 & 246 ; http://gacp.giss.nasa.gov/meeting/meet2/curran_summary.pdf (le 01/02/2014)]

[471] Précisons que la destruction de l'ozone stratosphérique fait augmenter l'OH troposphérique. Autre remarque complémentaire : les variations moyennes globales d'OH et CH_4 peuvent être corrélées de manière assez simple (« le processus de diminution de CH_4 atmosphérique global moyen au cours du temps est dominé par la réaction OH+CH_4 → CH_3+H_2O dans la troposphère ») ; aussi, le cœur des modélisations {OH, CH_4, O_3} peut-il être rapporté à des modélisations {OH, O_3}. [*IPCC (WG I)*, 1995, pp. 250 & 269]

Les auteurs du TAR indiquent que « l'infrastructure » de l'OxComp (« le site 'ftp ('file transfer protocol'), la base de données, les illustrations ('graphics'), et le financement scientifique ») a été fournie par le groupe de l'Université d'Oslo. Et, un 'OxComp Workshop' a été organisé par le 'Max-Planck Institute for Meteorology' à Hambourg, les 15-17 juillet 1999 (en parallèle du Workshop sur la modélisation des aérosols, dont les résultats seront utilisés dans le Chapitre 5 du TAR). Tous les modèles présentés au cours de la rencontre de Hambourg, listés dans le Tableau 6 ci-dessous, « intègrent de la chimie troposphérique globale 3-D incluant les hydrocarbures non-méthaniques (NMHC, 'Non-Methane HydroCarbons) ». [*IPCC (WG I)*, 2001, pp. 268 & 257 ; http://gacp.giss.nasa.gov/meeting/meet2/curran_summary.pdf (le 01/02/2014)]

CTM	Institute	Contributing authors	References
GISS	GISS	Shindell /Grenfell	Hansen *et al.* (1997b)
HGEO	Harvard U.	Bey / Jacob	Bey *et al.* (1999)
HGIS	Harvard U.	Mickley / Jacob	Mickley *et al.* (1999)
IASB	IAS/Belg.	Mülller	Müller and Brasseur (1995, 1999)
KNMI	KNMI/Utrecht	van Weele	Jeuken *et al.* (1999), Houweling *et al.* (2000)
MOZ1	NCAR/CNRS	Hauglustaine / Brasseur	Brasseur *et al.* (1998b), Hauglustaine *et al.* (1998)
MOZ2	NCAR	Horowitz/ Brasseur	Brasseur *et al.* (1998b), Hauglustaine *et al.* (1998)
MPIC	MPI/Chem	Kuhlmann / Lawrence	Crutzen *et al.* (1999), Lawrence *et al.* (1999)
UCI	UC Irvine	Wild	Hannegan *et al.* (1998), Wild and Prather (2000)
UIO	U. Oslo	Berntsen	Berntsen and Isaksen (1997), Fuglestvedt *et al.* (1999)
UIO2	U. Oslo	Sundet	Sundet (1997)
UKMO	UK Met Office	Stevenson	Collins *et al.* (1997), Johnson *et al.* (1999)
ULAQ	U. L. Aquila	Pitari	Pitari *et al.* (1997)
UCAM	U. Cambridge	Plantevin /Johnson	Law *et al.* (1998, 2000)(TOMCAT)

Tableau 6 : « Modèles de chimie-transport (CTM) ayant contribué à l'évaluation OxComp, « visant à prédire l'O_3 et l'OH troposphériques »
[*IPCC (WG I)*, 2001, « Table 4.10 », p. 268]

Pour les émissions passées d'ozone troposphérique, on retrouve MOGUNTIA dans la liste des modèles utilisés [*IPCC (WG I)*, 2001, p. 261]. Pour les projections futures, en revanche, MOGUNTIA n'est pas utilisé. Les Européens n'en sont pas moins omniprésents. Ils luttent sur un pied d'égalité avec les Etats-Uniens – là où, dans le cas de la destruction anthropique de l'ozone stratosphérique, les Européens avaient pris du retard à l'allumage (les Etats-Uniens étaient entrés de plain-pied dans l'affaire de l'ozone dès 1970, là où les Européens l'avaient fait seulement au milieu des années 1980). Le 'Max-Planck Institute (für Chemie)' présente un modèle MPI/Chem. L'Université d'Oslo présente deux versions d'un modèle nommé UIO. On retrouve parmi ses développeurs Ivar S.A. Isaksen, accompagné de deux compatriotes norvégiens du même groupe de recherche, Jan S. Fuglestvedt et Terje K. Bertner, avec qui il a publié plusieurs articles cités dans le Chapitre 4 du TAR sur la

chimie atmosphérique.[472] Quant au modèle MOZART (MOZ), il est le fruit d'une coopération entre l'équipe française de Didier Hauglustaine (Service d'Aéronomie, CNRS) et une équipe états-unienne du NCAR dirigée par le Belge Guy Brasseur.

Au moment de la production du TAR, G. Brasseur a en fait un pied au NCAR, et l'autre au 'Max-Planck Institute for Meteorology'. Ancien disciple de Marcel Nicolet, il a d'abord travaillé sur la question de l'ozone stratosphérique (et, en 1984, il a publié avec Susan Solomon un ouvrage théorique de référence sur le sujet, intitulé *Aeronomy of the Middle Atmosphere,* réédité en 1986). Brasseur en est venu à s'intéresser à l'ozone troposphérique – puis, plus généralement à la chimie troposphérique – par le biais de l'ozone stratosphérique. D'autres chimistes du TAR, Fuglestvedt par exemple, avaient plutôt consacré des études sur l'ozone en lien avec la thématique de qualité de l'air. Puis, dans les années 1990, avec la montée en échelle de la chimie de l'ozone troposphérique, un terrain d'investigation s'était constitué, à la croisée des thématiques de la couche d'ozone, de la qualité de l'air et du CC. Dans l'OxComp et le TAR, les modèles de Fuglestvedt et Brasseur se retrouvent comparés pour servir un même but : les effets de la photochimie troposphérique sur le climat.

Toutefois, élément à première vue surprenant, la confiance dans des modèles globaux de chimie troposphérique qui existe en 2001 est principalement venue d'une étude spéciale du GIEC sur les impacts des émissions d'oxydes d'azote (NO_x) par l'aviation, menée à la fin des années 1990 dans la lignée de travaux sur le sujet initiés dans les années 1980.

Le « Rapport spécial du GIEC sur l'aviation et l'atmosphère globale » (1999). La chimie des NO_x troposphériques, étudiée dans la lignée des travaux sur l'ozone stratosphérique

Les auteurs du quatrième chapitre du TAR signalent deux sources de progrès sur la chimie atmosphérique depuis le SAR. De nouveaux résultats proviennent des scientifiques de l'ozone (les auteurs renvoient au 'WMO/UNEP Scientific Assessment of Ozone Depletion' de 1999). D'autres résultats importants ont été apportés par le biais de travaux sur les impacts des émissions des avions. Les résultats ont notamment été publiés dans un

[472] Articles cités: Berntsen, T. and I.S.A. Isaksen, 1997: A global three-dimensional chemical transport model for the troposphere. 1. Model description and CO and ozone results. *J. Geophys. Res.*, 102, 21239-21280; Berntsen, T. and I.S.A. Isaksen, 1999: Effects of lightning and convection on changes in tropospheric ozone due to NOx emissions from aircraft. *Tellus*, 51B, 766-788; Berntsen, T., I.S.A. Isaksen, W.-C. Wang and X.-Z. Liang, 1996: Impacts of increased anthropogenic emissions in Asia on tropospheric ozone and climate. A global 3-D model study. *Tellus*, 48B, 13-32; Fuglestvedt, J.S., J.E. Jonson and I.S.A. Isaksen, 1994: Effects of reduction in stratospheric ozone on tropospheric chemistry through changes in photolysis rates. *Tellus*, 46B, 172-192; Fuglestvedt, J.S., J.E. Jonson, W.-C. Wang and I.S.A. Isaksen, 1995: Climate change and its effect on tropospheric ozone. In: Atmospheric Ozone as a Climate Gas, edited by W.C. Wang and I.S.A. Isaksen, pp. 145-162, NATO ASI Series vol. 132, Springer-Verlag, Berlin; Fuglestvedt, J.S., I.S.A. Isaksen and W.-C. Wang, 1996: Estimates of indirect global warming potentials for CH4, CO, and NOx. *Clim. Change*, 34, 405-437; Fuglestvedt, J.S., T. Berntsen, I.S.A. Isaksen, M. Liang and W.-C. Wang, 1999: Climatic forcing of nitrogen oxides through changes in tropospheric ozone and methane; global 3-D model studies. *Atmos. Env.*, 33, 961-977. [*IPCC (WG I)*, 2001, pp. 280-281]

Fuglestvedt, Berntsen et Isaksen sont membres du CICERO (Center for International Climate and Environmental Research), centre indépendant associé à l'Université d'Oslo, créé par décret royal en 1990.

« Rapport spécial du GIEC sur l'aviation et l'atmosphère globale », commun aux 'Working Groups' I et III (Penner *et al.* (Ed.), 1999). Pour l'occasion, restituent les auteurs du TAR, les scientifiques

> « avaient utilisé une large palette de CTM globaux, afin de prédire l'augmentation d'O_3 troposphérique due aux émissions de NO_x par les avions. Les résultats furent étonnamment robustes, non seulement en ce qui concerne l'augmentation moyenne d'O_3 hémisphérique, mais aussi en ce qui concerne l'augmentation d'OH moyen global décrit comme correspondant à une diminution du temps de vie du CH_4. » [*IPCC (WG I)*, 1999, p. 267]

Les auteurs du Chapitre 4 du TAR citent à plusieurs reprises ce rapport spécial du GIEC sur l'aviation et l'atmosphère globale, pas tant pour ses résultats sur les impacts radiatifs stratosphériques de l'aviation dans la stratosphère (au cœur de la longue tradition des travaux de ce type initiée dans les années 1960 ; voir Chapitre 4) donc,[473] ni pour ses résultats sur les impacts radiatifs troposphériques,[474] que pour les travaux sur les modélisations des réactions chimiques occasionnées par les vols aéronautiques. Sur ce dernier point, qui nous intéresse ici, on trouve en particulier des références à deux chapitres du rapport spécial du GIEC de 1999 : le « Chapitre 2. Impacts des émissions d'avions sur l'ozone atmosphérique » de Derwent et Friedl ; le « Chapitre 4. Modélisation de la composition chimique de l'atmosphère future » d'Isaksen et Jackman. Isaksen (Université d'Oslo) et Derwent (Met Office, Royaume-Uni) sont deux 'lead authors' du Chapitre 4 du TAR, et Friedl (Jet Propulsion Laboratory, NASA) et Jackman (Goddard Space Flight Center, NASA), deux 'contributing authors'. [*IPCC (WG I)*, 2001, pp. 243, 280-283]

Au milieu des années 1990, Isaksen avait en effet intégré un petit groupe de chercheurs européens qui travaillaient sur les NO_x et l'O_3 troposphériques à grande échelle, avec pour principal enjeu l'estimation de l'effet de serre de l'O_3 d'origine anthropique. La participation d'Isaksen à ce rapport du GIEC sur l'aviation fait suite à sa coopération à un programme de recherche européen sur les impacts des émissions aéronautiques, lancé quelques années plus tôt. Les avions de ligne (hors Concorde, qui vole plus haut) émettent en particulier des NO_x dans la haute troposphère, qui participent à la formation photochimique d'ozone.[475] Dans le

---

[473] Les auteurs du Chapitre 4 du TAR consacrent notamment une section « 4.1.5 » – très brève – au « H_2O stratosphérique », qui débute comme suit :

> "Water vapour in the lower stratosphere is a very effective greenhouse gas. Baseline levels of stratospheric H2O are controlled by the temperature of the tropical tropopause, a parameter that changes with climate (Moyer *et al.*, 1996; Rosenlof *et al.*, 1997; Dessler, 1998; Mote *et al.*, 1998). The oxidation of CH_4 is a source of mid-stratospheric H_2O and currently causes its abundance to increase from about 3 ppm at the tropopause to about 6 ppm in the upper stratosphere. In addition, future direct injections of H2O from high-flying aircraft may add H_2O to the lower stratosphere (Penner *et al.* (Ed.), 1999). Oltmans and Hofmann (1995) report statistically significant increases in lower stratospheric H_2O above Boulder, Colorado between 1981 and 1994." [*IPCC (WG I)*, 2001, p. 263]

[474] *Cf.* Prather, M. and R. Sausen, 1999, "Chapter 6. Potential Climate Change from Aviation" **in** Penner *et al.* (Ed.), 1999.

[475] Nous nous limitons ici au cas européen, mais des programmes semblables sur la chimie troposphérique globale existent à la même époque outre-Atlantique. D'abord, autour de Jackman et Friedl de la NASA. Nous ne sommes pas surpris de trouver des ressortissants de la NASA dans des études sur les impacts atmosphériques de l'aviation,

cadre de ce programme d'expertise européenne sur les impacts chimiques et climatiques des avions, Isaksen, accompagné de Bertner, s'était particulièrement intéressé au rôle des éclairs dans cette photochimie des NO_x d'origine aéronautique [Berntsen & Isaksen, 1999, "Effects of lightning and convection on changes in tropospheric ozone due to NO_x emissions from aircraft", *Tellus* **in** *IPCC (WG I)*, 2001, p. 278].

En 1998, on retrouve Isaksen sur la liste des auteurs d'un article intitulé "European scientific assessment of the atmospheric effects of aircraft emissions" (Brasseur *et al.*, 1998, *Atmos. Environ.*), aux côtés de Guy Brasseur et de Didier Hauglustaine. Isaksen n'est pas un spécialiste de l'ozone stratosphérique ; Guy Brasseur a par contre, comme nous l'avons dit, débuté ses travaux avec l'affaire de la destruction de l'ozone stratosphérique dans les années 1970. Dans les années 1990, il continue d'écrire sur la destruction de l'ozone, mais endosse par ailleurs, au NCAR où il est devenu Directeur de l''Atmospheric Chemistry Division' (1990-1999), la direction du 'Global Modeling Project'. A ses oreilles, le contexte de montée de la thématique du CC rime avec l'intégration de la chimie dans les modèles globaux. En 1992, il publie un chapitre « Chemistry–Transport Models » dans l'ouvrage *Climate System Modeling* (K. E. Trenberth (Ed.) ; avec Madronich), et devient membre de la 'Task Force on *Global Analysis, Interpretation and Modeling* (GAIM)' de l'IGBP (il le demeurera entre 1992 et 1994, puis entre 1998 et 2001). Entre 1995 et 2001, il est membre de l''International Commission on Atmospheric Chemistry and Global Pollution' (IAMAP/CACGP) – comme déjà auparavant entre 1979 et 1983… Tout en restant membre de l'International Ozone Commission (1992-2000, et 2008-…). Il publie en outre (notamment avec Claire Granier, du Service d'Aéronomie français) des travaux sur les impacts radiatifs et la chimie aérosol-gaz post-éruptions d'El Chichón (1982) et du Mont Pinatubo (1993).

Le Français Didier Hauglustaine, du Service d'Aéronomie, a quant à lui débuté sa carrière plus tardivement, au tournant des années 1990, en pleine explosion de la thématique du changement climatique. Ses compatriotes Gérard Mégie et Claire Granier, tous deux venus du champ d'étude de l'ozone stratosphérique, lui suggèrent de travailler à l'articulation entre climat et chimie atmosphérique. Hauglustaine s'intéresse d'abord aux CFC dans une perspective changement climatique (Hauglustaine D. & J.-C. Gérard, 1991,

---

une tradition d'étude aussi ancienne que l'agence elle-même, et renforcée par l'affaire de l'ozone. Autre personnalité importante de la chimie de l'ozone à grande échelle, Larry Horowitz, alors au NCAR (1997-1999) (depuis, au 'Geophysical Fluid Dynamics Laboratory' de la NOAA, rattaché à l'Université de Princeton University). Horowitz a participé au programme d'intercomparaison PhotoComp (Olson *et al.*, 1997, Results from the Intergovernmental Panel on Climatic Change photochemical model intercomparaison (PhotoComp), *J. Geophys. Res.*). Au cours des années précédentes, il avait contribué à plusieurs articles sur l'oxydation photochimique troposphérique : Staffelbach *et al.*, 1997, "Photochemical oxidant formation over southern Switzerland, 2, Model results", *J. Geophys. Res.*; Hirsch *et al.*, 1996, "Seasonal variation of the ozone production efficiency per unit NOx at Harvard Forest, Massachusetts", *J. Geophys. Res.*; Jacob *et al.*, 1995, "Seasonal transition from NOx- to hydrocarbon-limited conditions for ozone production over the eastern United States in September", *J. Geophys. Res.*

"Present and future CFC and other trace gas warming: results from a seasonal climate model", *Ann. Geophys.*). Puis, il travaille spécifiquement sur l'influence des NO_x sur l'ozone troposphérique, "sur le modèle de" ce qui a été fait auparavant sur l'influence des NO_x et de l'ozone stratosphérique (émis par les SST, notamment). En 1994, D. Hauglustaine, C. Granier, G. Brasseur et Gérard Mégie publient deux articles en commun. Le premier a pour titre « L'importance de la chimie atmosphérique dans le calcul du forçage radiatif du système climatique » (*J. Geophys. Res.*). Le second s'intitule « Impact des actuelles émissions d'oxyde d'azote par les avions sur l'ozone troposphérique et le forçage climatique » (1994, *Geophys. Res. Lett.*). Il avait été signalé par les auteurs du SAR, mais ces derniers avaient mis en garde au sujet de « limites de l'utilisation d'un modèle 2-D dans de telles études » [*IPCC (WG I)*, 1995, p. 111]… D'où les développements postérieurs, en 3-D, du modèle MOZART ('Model of OZone And Related chemical Tracers' ; « MOZ », dans le Tableau 6 *supra*) de Hauglustaine et ses collègues, pour le TAR.

Le monoxyde de carbone

Autre complexification des modèles dans le TAR : le monoxyde de carbone (CO) intègre les simulations de photochimie globale. La principale origine du monoxyde de carbone est la combustion incomplète des combustibles et des carburants. L'action délétère du monoxyde de carbone est depuis longtemps étudiée, en particulier pour l'air intérieur. Dans l'atmosphère des villes, les niveaux de monoxyde de carbone sont parfois élevés, la principale source étant la circulation automobile (et, "par effet boomerang", l'habitacle des voitures est l'un des micro-environnements les plus contaminés au CO). Le monoxyde de carbone est un gaz à effet de serre, mais l'intérêt que les auteurs du GIEC lui portent tient principalement à sa participation à la photochimie de l'ozone. Au début des années 1980, il existe déjà des schèmes chimiques complexes qui rendent interdépendants l'O_3, le radical OH, les NO_x, le méthane CH_4, le peroxyde d'hydrogène H_2O_2, l'acide nitrique HNO_3, …, et le monoxyde de carbone troposphérique. La Figure 33 de notre Chapitre 6, dessinée par Ehhalt en 1981 pour un chapitre de rapport SCOPE, en témoigne. En outre, Ehhalt, qui est rappelons-le le cofondateur du *Journal of Atmospheric Chemistry* (avec Crutzen, en 1983), propose dans le même document, des courbes corrélant la concentration d'OH avec, d'une part, les NO_2 (des NO_x), et d'autre part, le CO (pour différentes valeurs de NO_2). [Ehhalt, 1981 **in** *SCOPE*, 1981, Figures 5.2 et 5.3, pp. 85, 88 & 89]

Toutefois, il faut attendre la fin des années 1980 pour voir les premiers efforts de quantification des effets du monoxyde de carbone sur la composition globale de l'atmosphère. Ils seront principalement réalisés dans le cadre de la science du changement climatique (et, dans une moindre mesure, par le biais d'études sur les échanges d'ozone

entre troposphère et stratosphère sans lien avec le changement climatique). La capacité des modèles à simuler les concentrations en CO avait notamment été évaluée lors d'un programme d'intercomparaison organisé en 1997 dans le cadre de l'activité 'Global Integration Modelling' (GIM) du projet 'International Global Atmospheric Chemistry' (IGAC ; IGBP (ISCU)), le 'Tropospheric Ozone (O_3) Global Model Intercomparison Exercise'. Son objectif avait été l'évaluation, de manière systématique, des capacités des modèles globaux tridimensionnels à simuler l'ozone troposphérique et ses gaz précurseurs, et l'identification des principaux types d'incertitudes dans notre compréhension du budget d'O_3 troposphérique. Lors cet exercice, rapporteront Maria Kanakidou et ses collègues, « l'intercomparaison de douze modèles de chimie-transport global tridimensionnels avait montré des différences significatives entre modèles, même si tous suivaient les schémas généraux de la distribution globale du CO » [Kanakidou *et al.*, 1999, p. 263].

En 2001, les experts du GIEC concluent que « le monoxyde de carbone n'absorbe pas suffisamment de radiations infrarouges terrestres pour être compté parmi les gaz à effet de serre directs ». En revanche, poursuivent-ils, « son rôle indirect, qui contribue à déterminer les taux d'OH troposphérique, affecte le fardeau atmosphérique de CH_4 ». Les auteurs se réfèrent ici à un article précoce d'Isaksen (et Hov), "Calculations of trends in the tropospheric concentrations of O_3, OH, CO, CH_4 and NO_x" (1987, *Tellus*). De plus, ajoutent-ils, la présence de CO « peut mener à la formation d'O_3 » [*IPCC (WG I)*, 2001, p. 256]. Au cours des années 1990, parallèlement aux études renouvelées sur le NO_x, devant notamment expliquer les taux d'O_3 troposphérique globaux au sein de la science du changement climatique, les études sur le CO global s'étaient faites plus nombreuses dans la littérature sur le changement climatique. On retrouve, là encore, les noms Berntsen, Isaksen, Brasseur et Granier.[476]

Depuis le SAR, résument les autres du Chapitre 4 du TAR, « *deux nouvelles découvertes importantes ont démontré l'importance de la chimie atmosphérique dans leur contrôle des gaz à effet de serre* ». D'une part, « il existe à présent une plus grande confiance dans l'expertise des

[476] Parmi les études sur les NO_x qu'ils produisirent, nous citerons : Fuglestvedt J.S., T. Berntsen, I.S.A. Isaksen, M. Liang & W.-C. Wang, 1999, "Climatic forcing of nitrogen oxides through changes in tropospheric ozone and methane; global 3-D model studies", *Atmos. Env.*, 33, pp. 961-977 ; Thakur A.N., H.B. Singh, P. Mariani, Y. Chen, Y. Wang, D.J. Jacob, G. Brasseur, J.-F. Müller & M. Lawrence, 1999, "Distribution or reactive nitrogen species in the remote free troposphere: data and model comparisons", *Atmos. Env.*, 33, pp. 1403-1422.

Pour le CO, citons, en suivant les mêmes chercheurs : Granier, Müller, Madronich & Brasseur, 1996, "Possible causes for the 1990-1993 decrease in the global tropospheric CO abundance: A three-dimensional study", *Atmos. Environ.* ; Berntsen & Isaksen, 1997, "A global three-dimensional chemical transport model for the troposphere. 1. Model description and CO and ozone results", *J. Geophys. Res.* (le modèle dont il est question est le modèle UIO) ; Kanakidou, M. and P.J. Crutzen, 1999, "The photochemical source of carbon monoxide: importance, uncertainties and feedbacks", *Chemosphere: Global Change Science*, 1, pp. 91-109 ; Kanakidou M., F.J. Dentener, G.P. Brasseur, T.K. Berntsen, W.J. Collins, D.A. Hauglustaine, S. Houweling, I.S.A. Isaksen, M. Krol, M.G. Lawrence, J.-F. Müller, N. Poisson, G.J. Roelofs, Y. Wang and W.M.F. Wauben, 1999, "3-D global simulations of tropospheric CO distributions - results of the GIM/IGAC intercomparison 1997 exercise", *Chemosphere: Global Change Science*, 1, pp. 263-282 (Kanakidou *et al.*, 1999).

modèles sur l'augmentation de l'O_3 troposphérique depuis la période pré-industrielle, qui s'élève à 30% lorsqu'on en réalise une moyenne globale, ainsi que sur sa réponse aux émissions à venir. Pour des scénarios dans lesquels l'abondance de CH_4 double et les émissions de CO et NO_x anthropiques triplent, il est prévu que l'abondance d'O_3 troposphérique augmente de 50% par rapport à aujourd'hui. » D'autre part, « le CO est identifié comme un important gaz à effet de serre indirect. Une addition de CO à l'atmosphère perturbe la chimie des OH-CH_4-O_3. Les calculs des modèles indiquent que l'émission de 100 Mt de CO engendre une perturbation de la chimie atmosphérique [des OH-CH_4-O_3] qui est [radiativement] équivalente à une émission directe de CH_4 de 5 Mt environ. » [*IPCC (WG I)*, 2001, p. 241]

La rencontre des chimistes de l'ozone stratosphérique, des pluies acides et des pollutions urbaines dans le Chapitre 4 du TAR, prolégomènes à une chimie troposphérique globale

Quelle sociologie peut décrire la variété des experts du « Chapitre 4. Chimie atmosphérique et gaz à effet de serre » du TAR, auteurs du premier grand effort d'introduction des CTM dans une expertise du GIEC ? Nous proposons de privilégier la description de longues dynamiques de recherche dans lesquelles s'inscrivent ces acteurs.

L'introduction des CTM a été réalisée par une poignée de chercheurs. La plupart d'entre eux avaient été formés à l'école de *la science de la destruction de l'ozone stratosphérique*. Que l'on prenne les deux 'Co-ordinating Lead Authors' du Chapitre 4 du TAR. Qui sont-ils ? D'abord, l'Allemand D. Ehhalt. Contrairement à Crutzen, Ehhalt n'a pas joui de la reconnaissance de "découvreur" d'un mécanisme de destruction de l'ozone stratosphérique, et s'est par ailleurs plus volontiers plié aux exigences des rédactions et relectures des grands rapports internationaux que son homologue néerlandais. Mais pour le reste, son parcours ressemble beaucoup à celui de Crutzen. Ehhalt rejoint le NCAR dès 1969 (donc avant la crise de l'ozone aux Etats-Unis), quelques années avant Crutzen. Il y réalise des estimations de contaminations de l'environnement atmosphérique par les essais thermonucléaires, en particulier par le tritium. En novembre 1974, il publie une longue « note technique » pour le NCAR, qui a pour titre « Profils verticaux de HTO, de HDO et de H_2O dans la troposphère » [Ehhalt, 1974]. Mais, au cours de la même année, Ehhalt a également été sollicité par le CIAP ('Climate Impact Assessment Program' ; 1971-75). Ses études sur les contaminations nucléaires l'ont en effet conduit jusque dans la stratosphère, au sujet de laquelle il a acquis des compétences utiles pour les scientifiques du CIAP – dont l'expertise est, rappelons-le principalement focalisée sur la destruction de l'ozone stratosphérique, thématique qui est alors sur toutes les lèvres.

Le second 'Co-ordinating Lead Author' du Chapitre 4 du TAR est l'Etats-Unien Michael Prather, de l'Université de Californie. Il est également venu à la chimie atmosphérique globale par l'ozone stratosphérique. Alors qu'il travaille au 'Goddard Institute for Space Studies' de la NASA, on le retrouve dans les 'panels' de deux chapitres du grand rapport de 1985 sur l'ozone ("Chapter 12. Assessment model" et "Chapter 13. Model Predictions of Ozone Changes"). De manière générale, les chercheurs venus à la chimie atmosphérique globale par l'ozone stratosphérique sont les représentés. Outre G. Brasseur, G. Mégie et C. Granier (les deux derniers comptant parmi les instigateurs du projet d'étude des NO_x de l'aviation, auquel participera également D. Hauglustaine), citons S. Solomon, John Daniel, D. Wuebbles, Paul Fraser, Jennifer Logan, M. McFarland (de chez DuPont).

Par contre, nous sommes frappé de ne trouver dans la liste aucun spécialiste des smogs urbains.[477] Ils viendront se greffer postérieurement à la communauté du CC, avec la montée des thématiques des « mégacités » et de « la qualité de l'air globale » (voir Section suivante) [*IPCC (WG I)*, 2001, pp. 833-834].

Néanmoins, certains des auteurs du Chapitre 4 du TAR avaient travaillé déjà épisodiquement sur les questions de pollutions locales ou régionales, en particulier avant la montée des thématiques de l'ozone et du changement climatique dans les années 1980. Certains avaient ainsi débuté leur carrière en travaillant sur les pollutions au SO_2, toxiques, qui gangrenaient certaines villes occidentales jusque dans les années 1970. Aujourd'hui, ces pollutions restent importantes dans certaines agglomérations européennes et nord-américaines, mais leurs concentrations ont globalement baissé. On le doit, en partie, à des politiques publiques, menées dans le sillage de l'amendement du 'Clean Air Act' britannique de 1956 (quatre ans après l'épisode dit du 'Great Smog' à Londres), et de l'action de l'EPA états-unienne à partir de 1970 (dans le même temps, les pollutions au SO_2 ont en revanche explosé dans les pays lancés dans un procès de forte industrialisation).

On le doit, en outre, à la mobilisation contre les pluies acides, particulièrement importante dans les années 1980. Les Norvégiens Fuglestvedt et Isaksen, par exemple, sont venus à l'étude de la chimie à grande échelle par le biais d'études sur les précipitations acides.

[477] La plupart des évènements de smogs observés aujourd'hui dans les grandes agglomérations sont caractérisés par de forts taux d'ozone, qui est généré par des réactions photochimiques complexes entre polluants primaires, dits « précurseurs d'ozone » (oxydes d'azote et composés organiques volatils, notamment, émis principalement par les transports et l'industrie), et par de particules fines issues de combustions fossiles (véhicules moteurs, industries) ou de biomasse (chauffage au bois, feux en plein air). Ces épisodes de pollution, dont certains signes sont visibles à l'œil nu, se produisent dans des conditions météorologiques particulières (le smog se forme typiquement au cours d'après-midi très chauds et ensoleillés, et par vent faible).

La principale origine de pluies acides est le SO_2 anthropique. Dans la lignée des travaux effectués sur l'acidification des précipitations (dans les pays scandinaves, depuis la fin des années 1950), Rodhe et Isaksen signent dès 1980 un article sous le titre "Global distribution of sulfur compounds in the troposphere estimated in a height/latitude transport model" (*J. Geophys. Res*). Onze ans plus tard, Langner et Rodhe, du Département de Météorologie de l'Université de Stockholm, publient un "A global three-dimensional model of the tropospheric sulfur cycle" (*J. Atmos. Chem.*). En fait, la science des pluies acides ne recourt pas à des schèmes d'équations chimiques complexes – le grand enjeu épistémologique se trouvant dans la modélisation du transport des polluants.[478] En revanche, les études sur les composés soufrés qu'avait suscitées l'affaire des pluies acides conduiront "naturellement" certains chercheurs à étudier le cycle global du soufre. Et donc, à contribuer à la construction d'une science globale des cycles biogéochimiques, socle de la Science du Système Terre, et de la science du changement climatique.

Les pluies acides ont pour seconde origine principale le NO_2, et plus généralement les NO_x. Si nous suivons les mouvements des acteurs, nous retrouvons, avec les NO_x, un type de cheminement sociologique semblable à celui que nous venons d'observer pour le SO_2. Dans les années 1980, les NO_x deviennent un objet d'étude au carrefour de plusieurs thématiques. Outre leur contribution aux pluies acides, les NO_x participent à la chimie des O_3-CH_4-OH. Cette chimie dépend des échanges entre ozone troposphérique et ozone stratosphérique, qui intéressent les chimistes de l'ozone stratosphérique. L'émulation autour de la destruction de la couche d'ozone a profité aux études sur les NO_x et l'O_3 dans la troposphère (d'autant plus que les liens épistémologiques entre NO_x, émis par les avions supersoniques, et O_3 avaient été étudiés pour la stratosphère, dans la lignée de Johnston, 1971). Enfin, les NO_x jouent un rôle dans le CC. D'abord, parce que l'un des NO_x, le NO_2, est un GES. Ensuite et surtout, parce que les NO_x interviennent dans la chimie de deux puissants GES, l'ozone et le méthane. Au cours des années 1990, certains auteurs, tels que J. Fuglestvedt, J. Jonson, W. Wang et I. Isaksen, publient sur les deux fronts de la chimie stratosphérique et des impacts des NO_x sur le CC.[479] Ils s'essaient même à estimer les effets du CC sur les taux

[478] Pour être précis, il existe bien une chimie du SO_2 dans le cas des pluies acides. D'abord, le soufre est adsorbé par des aérosols – ce qui permet en outre de le "tracer" plus facilement. Ensuite, lors de son transport atmosphérique, si l'atmosphère est "humide", le dioxyde de soufre SO_2 se transforme en acide sulfurique (H_2SO_4). Même chose pour les oxydes d'azote (NO et NO_2), qui se transforment en acide nitrique (HNO_3) dans le cas où l'atmosphère est humide. Signalons que, outre le SO_2 et les NO_x, le chlore et le fluor anthropiques participent également aux retombées acides par la formation respective d'acides chlorhydrique (HCl) et fluorhydrique (HF).

[479] *Cf.* Fuglestvedt J.S., J.E. Jonson & I.S.A. Isaksen, 1994, « Effects of reduction in stratospheric ozone on tropospheric chemistry through changes in photolysis rates », *Tellus* ; Fuglestvedt, Isaksen & Wang W.-C. [à la State University of New York depuis 1970], 1996, « Estimates of indirect global warming potentials for CH_4, CO, and NO_x », *Clim. Change* ; Fuglestvedt, Berntsen, Isaksen, Liang & Wang, 1999, « Climatic forcing of nitrogen oxides through changes in tropospheric ozone and methane; global 3-D model studies », *Atmos. Env.*

d'ozone.[480] Dernier enjeu climatique des NO_x : certains dépôts de produits de réaction impliquant les NO_x fertilisent la biosphère, donc stimulent sa captation du CO_2. [*IPCC (WG I)*, 2001, p. 241][481]

Après l'élan produit, dans les années 1970-80, par la montée en puissance des pluies acides et les échanges d'ozone entre stratosphère et troposphère, et dans une moindre mesure des études des pollutions soufrées et azotées, une impulsion nouvelle est donnée à la chimie troposphérique globale au cours des années 1990. Elle a pour origine des études réalisées en Asie de l'Est et au-dessus de l'Océan Pacifique. Avec l'essor des pollutions atmosphériques est-asiatiques, chinoises en particulier, la décennie 1990 voit en effet la montée de la double thématique du transport des polluants de l'Asie orientale vers la côté ouest de l'Amérique du nord, et de la mesure des polluants "de fond" (loin des agglomérations), au-dessus de l'Océan Pacifique. Les deux principaux polluants étudiés sont le méthane, d'une part, émis notamment par les activités de riziculture et d'élevage, et d'autre part l'ozone, lié aux « pollutions métropolitaines ».

Les auteurs du TAR (2001) rappellent que, de manière générale, l'impact des pollutions urbaines, et « en particulier de l'O_3 et du CO » sur « l'air ambiant (background air') des Océans atlantique et pacifique a été mis en exergue par de nombreuses études au cours de la décennie passée ». Les auteurs signalent ensuite « l'augmentation particulièrement rapide des émissions de polluants (NO_x, CO, VOC) en Asie de l'Est », et citent les résultats du CTM de Bernsten et collègues (1999), qui « prédisent des augmentations notables et prochaines de CO et d'O_3 dans le nord-ouest des USA, du fait d'un doublement des émissions actuelles en Asie ». [*IPCC (WG I)*, 2001, p. 279]

Les auteurs européens, et surtout les chercheurs d'Amérique du nord (qui sont "victimes" des pollutions asiatiques), demeurent majoritaires.[482] Toutefois, les chercheurs est-asiatiques trouvent avec l'ozone et le méthane une nouvelle grande porte d'entrée dans la littérature scientifique "internationale" (en langue anglaise), ainsi que dans l'expertise du

[480] *Cf.* Fuglestvedt J.S., J.E. Jonson, W.-C. Wang & I.S.A. Isaksen, 1995, "Climate change and its effect on tropospheric ozone" **in** W.C. Wang and I.S.A. Isaksen (Ed.), 1995, *Atmospheric Ozone as a Climate Gas*, 1995, NATO ASI Series vol. 132, Springer-Verlag, Berlin, pp. 145-162.

[481] Remarque : nous avons signalé la présence de nombreux Scandinaves dans les études de chimie troposphérique. Une étude spécifique serait nécessaire afin de fournir une explication à cette anomalie.

[482] La bibliographie du Chapitre 4 du TAR signale les articles suivants : Berntsen, T., I.S.A. Isaksen, W.-C. Wang and X.-Z. Liang, 1996: Impacts of increased anthropogenic emissions in Asia on tropospheric ozone and climate. A global 3-D model study. *Tellus*, 48B, 13-32 ; Berntsen, T.K., S. Karlsdottir and D.A. Jaffe, 1999: Influence of Asian emissions on the composition of air reaching the North Western United States. *Geophys. Res. Lett.*, 26, 2171-2174 ; Jaffe, D.A., T. Anderson, D. Covert, R. Kotchenruther, B.Trost J. Danielson, W. Simpson, T. Berntsen, S. Karlsdottir, D. Blake, J. Harris and G. Carmichael, 1999: Transport of Asian air pollution to North America. *Geophys. Res. Lett.*, 26, 711-714 ; Jacob, D.J., J.A. Logan and P.P. Murti, 1999: Effect of rising Asian emissions on surface ozone in the United States. *Geophys. Res. Lett.*, 26, 2175-2178 ; (van) Aardenne, J.A., G.R. Carmichael, H. Levy, D. Streets and L. Hordijk, 1999: Anthropogenic NOx emissions in Asia in the period 1990-2020. Atmos. Env., 33, 633-646.

GIEC (où ils ont déjà commencé à travailler sur le CO_2 et les aérosols soufrés, notamment). Ainsi, les Japonais Kato (Institut central de Recherche de l'Industrie de production électrique du Japon) et Akimoto (Centre de Recherche pour l'Avancée de la Science et de la Technologie, Université de Tokyo) signent dès 1992 un « inventaire des émissions anthropiques de SO_2 et de NO_x en Asie » dans *Atmospheric Environment*. Dans cette synthèse, ils montrent que les émissions de NO_x en Asie de l'Est augmentent de 4% par an (alors que dans le même temps, les importantes émissions européennes et états-uniennes restent relativement stables) [**in** *IPCC (WG I)*, 2010, p. 259].[483] L'expertise des Asiatiques est également précieuse au sujet du méthane, dont une part croissante des émissions est liée à la riziculture.[484] Parmi les chercheurs asiatiques, les Chinois sont les plus représentés dans la bibliographie du Chapitre 4 du TAR. Et, M. Wang, de l'Institut de Physique atmosphérique de Chine, compte parmi les 'lead authors'. Il ne faut donc pas voir dans la décision d'organiser la session finale du 'Working Group I' du TAR à Shanghai (17-20 janvier 2001) une simple action protocolaire visant à mobiliser la Chine sur le changement climatique. Un processus de recherche ambitieuse, croissante sur le changement climatique a alors déjà été mis en route. Toutefois, il faut reconnaître que les scientifiques travaillant dans des laboratoires chinois sur le changement climatique demeurent peu nombreux au tournant des années 2000. Pour la totalité du rapport du WGI du TAR, nous avons dénombré seulement treize « contributeurs » et neuf « reviewers » chinois, sur la trentaine de pages de noms recensés [*IPCC (WG I)*, 2001, Appendix III & IV. Contributors & Reviewers to the IPCC (WG I) WGI Third Assessment Report », pp. 827-859].

Relevons, pour finir, de premiers efforts de coopération entre chercheurs occidentaux et est-asiatiques. Par exemple, le travail commun sur l'article "Seasonal characteristics of tropospheric ozone production and mixing ratios over East Asia: A global three-dimensional chemical transport model analysis" (2000, *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*), qui a réuni des chercheurs travaillant au Japon (Daiju Narita et Hajime Akimoto, du Centre de Recherche pour l'Avancée de la Science et de la Technologie de l'Université de Tokyo) et des chercheurs basés en Europe et aux Etats-Unis (Didier Hauglustaine (Service d'Aéronomie), Guy Brasseur (NCAR puis Max Planck Institut für Meteorologie), Denise L. Mauzerall (NCAR puis Princeton), Larry Horowitz (NCAR puis NOAA/Princeton), Stacy Walters

[483] L'occasion pour nous de rappeler que, si nous nous focalisons dans ce Sous-chapitre sur l'élaboration des modèles, il ne faut pas perdre de vue que s'étoffe, en parallèle, la partie immergée de l'iceberg : les mesures atmosphériques.

[484] Quelques publications recensées par le TAR: Sass, R.L., F.M. Fisher Jr., A. Ding & Y. Huang, 1999, "Exchange of methane from rice fields: national, regional, and global budgets", *J. Geophys. Res.*, 104, 26943-26951 ; Wang, M.X. & X. Shangguan, 1996, "CH4 emission from various rice fields in P.R. China", *Theoretical and Applied Climatology*, 55, 129-138 ; Ding, A. and M.X. Wang, 1996, "A Model for methane emission from rice field and its application in southern China", *Advances in Atmospheric Sciences*, 13, 159-168.

(NCAR)).

Toutefois, au tournant des années 2000, de fortes identités nationales, régionales et continentales subsistent dans la recherche troposphérique.[485] Et, en 2000, dans sa recension de l'ouvrage *Atmospheric Chemistry and Global Change* signé Guy Brasseur, John Orlando et Geoffrey Tyndall (Brasseur *et al.*, 1999), le Suédois de Stockholm Henning Rodhe peut reprocher à ses collègues d'adopter une perspective trop nord-américaine. Il écrit :

> « Il est intéressant – et quelque peu décevant – de relever le fort part pris ('the strong biais') dans plusieurs chapitres. Les problèmes de pollution régionale (ozone troposphérique, pluies acides) sont systématiquement illustrés avec des cartes de l'est nord-américain. Aux yeux d'un Européen fortement impliqué dans les études sur le problème des pluies acides à la fin des années 1960 et dans les années 1970, il est étrange de lire dans l'encadré historique de la page 466 que « le problème de l'acidification environnementale a reçu beaucoup d'attention dans les années 1980, lorsqu'il devint évident que la vie aquatique et les forêts avaient été gravement endommagées ». J'aurais également aimé voir de plus nombreuses discussions au sujet des problématiques de chimie atmosphérique dans les pays tropicaux. » [Rodhe, 2000, p. 108]

Concluons. Dans les années 1980-90, seuls les chimistes de l'atmosphère qui se sont intéressés à des phénomènes aux *échelles* d'espace et de temps importantes se projettent dans la science du changement climatique. Les principaux participants à l'expertise "chimiste" des trois premiers rapports du GIEC sont en effet des "chimistes" spécialistes de la destruction de la couche d'ozone à échelle globale, ou des scientifiques ayant étudié des phénomènes de pollution continentale et hémisphérique (des pollutions dites "transfrontières", comme le dioxyde de soufre SO_2 et les oxydes d'azote NO_x) pour ensuite se projeter vers le global (pour travailler, par exemple, sur le cycle biogéochimique du soufre ou de l'azote).

Mais, dans le même temps, la thématique de la pollution "de fond" globale (ou, plutôt, hémisphérique) monte : pollution aux NO_x, pollution à l'ozone, pollution au méthane. Or, cet élan n'est plus le seul fait de scientifiques spécialisés dans les questions à grande échelle. Mais de chercheurs qui, soit parce qu'ils jugent la pollution globale de fond importante dans leur compréhension des phénomènes de pollution de l'air régionale, soit parce qu'ils escomptent s'inscrire dans la juteuse et stimulante dynamique de recherche sur le changement climatique, combinent et recombinent les échelles (locale, régionale et globale). Certains chercheurs est-asiatiques, notamment, ou des chercheurs occidentaux travaillant sur les pollutions est-asiatiques, projettent à présent leurs travaux sur les pollutions régionales vers le global. Le phénomène n'est pas généralisable aux chimistes des pollutions très

[485] Parallèlement, de fortes disparités subsistent bien sûr dans la quantité de recherches atmosphériques effectuées dans les différentes régions du monde.

locales, ni même à l'ensemble des chimistes des pollutions régionales. Il ne touche que certaines niches. Ainsi, les travaux sur le méthane issus de la riziculture. Et surtout, les études sur les pollutions dans les mégacités. Celles-ci deviennent un thème de recherche important dans les années 2000. La problématique du couplage du changement climatique et de qualité de l'air, en particulier, occasionne de nombreuses coopérations entre Est et Ouest, à un moment où les émissions anthropiques de la Chine rattrapent à grand pas celles des Etats-Unis.

2007 & 2014. Une multitude de modèles, pour le global et le régional

Les premières tentatives d'intégration de la chimie atmosphérique dans les AOGCM

Dans les deuxième et troisième rapports du GIEC (1995 et 2001), les modèles de chimie-transport (CTM, 'Chemical-transport models') 3-D sont utilisés avant tout pour « traduire les scénarios d'émission en » concentrations d'aérosols et gaz troposphériques ayant une fonction radiative significative à l'échelle globale (aérosols soufrés, CH_4, de HFC, d'O_3, *etc.*) [*IPCC (WG I)*, 2001, p. 246]. Le SAR (1995) marque de premières prises en considération de modèles numériques de chimie-transport "primitifs" dans la science du GIEC. Il ne s'agit pas de modéliser des interactions chimiques complexes pertinentes pour le changement climatique. Nul modèle de photochimie globale n'y est utilisé, ni pour simuler la chimie stratosphérique, ni pour simuler la chimie troposphérique (il est simplement fait mention, à une unique occasion, d'un modèle numérique de calcul de l'O_3, du CO et des NO_x *à échelle continentale*, développé par les Etats-uniens Jacob, Logan, Prather, Wofsy et collègues) [*IPCC (WG I)*, 1995, p. 123]. Les seuls GCM du SAR qui intègrent la chimie sont, d'une part, le modèle MOGUNTIA (Langner & Rodhe, 1991) et ses successeurs, qui calculent des distributions globales d'aérosols soufrés sur la base d'hypothèses très simples sur la chimie du SO_2, et d'autre part, des modèles semblables, qui déclinent MOGUNTIA pour le carbone suie (Cooke & Wilson, 1996).[486] [*IPCC (WG I)*, 1995, p. 105]

Le TAR (2001) marque l'entrée des modèles de chimie-transport globaux plus complexes, qui simulent la *photochimie troposphérique à l'échelle globale* (O_3, NH_4, OH, NO_x, CO). Son Chapitre 4 « utilise des modèles de chimie-transport (CTM) 3-D, afin d'intégrer des processus de variabilité chimique dans des conditions globales, d'estimer leur importance, et de traduire les scénarios d'émission en termes de changement d'abondance des gaz à effet de serre CH_4, HFC et O_3 », comme le formulent ses auteurs. Toutefois, ceci signifie que, à ce

[486] Ces modélisations témoignent en tout cas du souci précoce du GIEC d'estimer le pouvoir de réflexion des aérosols soufrés et du carbone suie. Mais, l'impact radiatif de ces deux types d'aérosol est resté, depuis, une énigme difficile à résoudre.

stade, les CTM 3-D globaux ne sont *pas encore couplés aux (AO)GCM*, qui sont les seuls aptes à évaluer des phénomènes de changement climatique (selon différents scénarios d'émissions). Le TAR fait mention d'une unique tentative, très récente, qui a vu « un modèle de chimie troposphérique 3-D couplé à l'AOGCM du Hadley Centre » (Royaume-Uni), et soumis à des scénarios d'émissions. Mais, aucun résultat n'est avancé ; les auteurs indiquent simplement : « ces études pointent clairement l'importance d'inclure les rétroactions climat-chimie, mais ne constituent que le début de la recherche nécessaire pour une expertise satisfaisante » [*IPCC (WG I)*, 2001, pp. 246 & 278-279]. Pour les chimistes de l'atmosphère, le premier enjeu des travaux post-2001 réside dans de périlleuses tentatives de couplage des CTM aux AOGCM, c'est-à-dire dans l'élaboration de modèles dits « de chimie-climat », les CCM (Chemistry-Climate Models) ».

Les CTM 3-D continuent à être utilisés dans les rapports suivants (2007 et 2014), pour répondre avec précision à des questions particulières de type « calculer le forçage radiatif dû à l'ozone troposphérique depuis l'ère pré-industrielle » [*IPCC (WG I)*, 2007, p. 151]. Mais surtout, le GIEC intègre dans les années 2000 des modèles couplés dits de chimie-climat (CCM, 'Chemistry-Climate Models') – comme le font dans le même temps les 'Ozone Assessments' (mais en se limitant à l'ozone). Néanmoins, les auteurs du « Chapitre 8. Modèles climatiques et leur évaluation » du quatrième rapport du GIEC (AR4, 'Assessment Report n°4', 2007) ne consacrent qu'une très courte Section à la « modélisation des aérosols et la chimie atmosphérique ». Ils reconnaissent que, « en règle générale, la chimie réactive n'est pas prise en compte dans les simulations utilisées dans le rapport ». Et, parmi la petite vingtaine d'AOGCM sur lesquels le GIEC base ses conclusions (la liste dressée compte 23 AOGCM, mais certains d'entre eux sont simplement des variantes d'un même modèle, développé au sein d'un même laboratoire), seul le modèle CCSM3 du NCAR (la troisième version du 'Community Climate System Model')[487] résout des équations chimiques. « Il inclut la modification des concentrations de gaz à effet de serre par des processus chimiques, ainsi que la conversion de dioxyde de soufre et du diméthylsulfure en aérosols soufrés », expliquent les auteurs de l'AR4 [*IPCC (WG I)*, 2007, Section « 8.2.5 », pp. 607 ; « Figure 8.2 », p. 631 ; « Figure 8.1 », pp. 597-599 ; Blackmon *et al.*, 2001]. Dans l'AR4, les simulations du CCSM3 sont, par exemple, utilisées afin d'estimer l'évolution temporelle de la circulation méridionale thermohaline de l'océan Atlantique entre 1990 et 2100, d'après

[487] Un 'Community Climate Model (CCM)' avait été développé dès 1983 par le NCAR. Puis, en 1994, la NSF, le bailleur de fonds naturel du NCAR, approuva le développement d'un modèle plus intégré, le Climate System Model (CSM), qui inclurait l'océan global et les glaces de mer. Suite au premier 'CSM Workshop' de mai 1996 (Breckenridge, Colorado), deux institutions de poids, le DoE et la NASA, se rejoignirent au projet de développement du CSM. A cette occasion, ce dernier fut rebaptisé 'Community Climate System Model (CCSM)'.

des données passées et un scénario particulier d'émissions futures (voir l'avant-dernière courbe, « NCAR-CCSM3.0 », de la Figure 46 ci-dessous, extraite du Chapitre 10 de l'AR4).

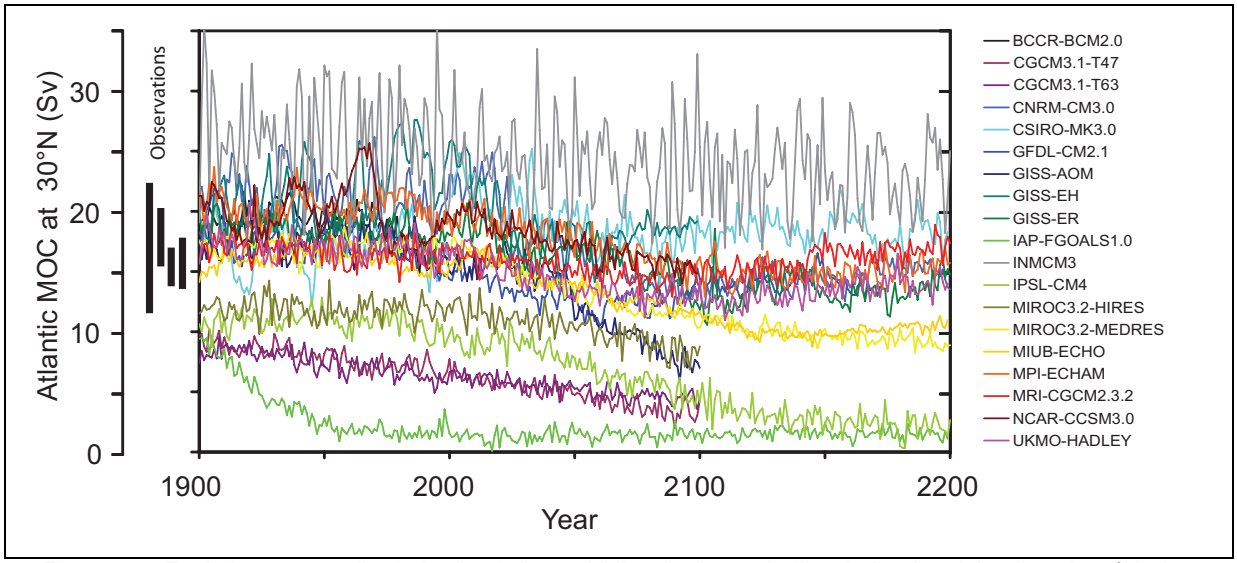


Figure 46 : Evolution temporelle de la circulation méridionale thermohaline de l'océan Atlantique à 30°N, dans des simulations réalisées avec 19 des 23 modèles climatiques couplés AOGCM, en utilisant le scénario d'émission « SRES A1B » pour les années 1999 à 2100

[*IPCC (WG I)*, 2007, « Figure 10.15 », p. 773]

Toutefois, à l'époque de l'AR4, la chimie prise en compte dans le modèle couplé CCSM3 demeure faible. En 2006, les modélisateurs du « Community Climate System Model Version 3 (CCSM3) » n'en sont qu'aux premiers pas d'extension de leur modèle à « un traitement complet de la biogéochimie océanique et terrestre et des dynamiques des écosystèmes ». En ce qui concerne l'atmosphère en particulier, ils viennent seulement d'initier de premières simulations incluant « des représentations détaillées de la chimie réactive, de la photochimie et de la microphysique des aérosols » [Collins *et al.*, 2006, p. 2141].

Modèles du Système de Terre de grande complexité (ESM) et de complexité intermédiaire (EMIC)

Aussi, l'intégration de la chimie de l'ozone et du méthane à l'échelle globale est-elle l'une des raisons principales invoquées par les chercheurs du NCAR (J.-F. Lamarque et F. Vitt) et du LLNL (P. Cameron-Smith, P. Connell et C. Chuang), lorsqu'ils exposent, au cours de la même année 2006, leur projet en cours de développement d'un 'Earth System Model' (ESM), plus complet que le CCSM, dans un article intitulé "Toward an Earth system model: atmospheric chemistry, coupling, and petascale computing" (2006). A la présence de chercheurs du LLNL, qui ont demeuré invariablement aux commandes des ordinateurs les plus puissants depuis la fin des années 1970 (en ce qui concerne les modèles globaux de

l'ozone stratosphérique et du changement climatique, s'entend), répond l'injonction de pousser les ordinateurs dans leurs derniers retranchements. Les auteurs de l'article annoncent que leur système du Système Terre devra recourir, non plus à une informatique « à échelle téra » (10^{12}), mais « à échelle péta » (10^{15}).[488] Mais, quels processus nouveaux cet ESM doit-il intégrer, que n'incorporaient pas les CCSM ? La chimie atmosphérique, précisément !, dont la chimie O_3-NO_x-CH_4-… Les auteurs écrivent :

> « Les aérosols et composés chimiques atmosphériques sont des composants interactifs du système Terre, avec des implications pour le climat. Dans le cadre du consortium entre laboratoires SciDAC [pour « la découverte scientifique à travers les avancées de l'informatique »],[489] nous avons implémenté un état de l'art modulable de la chimie atmosphérique et des fonctionnalités des aérosols dans le Community Climate System Model (CCSM) ('we have implemented a flexible state-of-the-art atmospheric chemistry and aerosol capability into the Community Climate System Model (CCSM)'). Nous avons également développé un mécanisme [, c'est-à-dire un modèle, ou une partie de modèle,] rapide pour la chimie ['a fast chemistry mechanism', mécanisme simplifié afin d'alléger le modèle)], qui est en bon accord avec les observations et est plus efficace 'computationnellement' que nos mécanismes de chimie plus complexes. Nous travaillons avec d'autres collègues pour coupler cette fonctionnalité avec des fonctionnalités

---

[488] Cameron-Smith (du LLNL) et ses collègues du LLNL et du NCAR écrivent :

"[T]he advantages of this shift toward Earth system models can only be realized by moving from terascale computing up to petascale computing.

"The current CCSM climate model currently runs at the terascale level. But even though the Earth system model being developed is only about an order of magnitude more costly per simulated year, the actual cost will be much greater for several reasons:

- The increased variability from the extra components, plus the possibility of flipping to different climate states, will require a greater number of realizations for each experiment, i.e. identical simulations with slightly altered initial conditions. This is to handle the well known "butterfly" chaos effect.
- Longer, more complex, spinup procedures are need to bring simulations with land and ocean biospheres into balance.
- The large increase in possible feedbacks between all the Earth system elements will require a corresponding increase in human and computational resources to understand the system behaviour.

"The good news is that the inclusion of a large number of tracers offers new possibilities for parallelization and scaling. Also, multiple realizations and sensitivity studies are embarrassingly parallel, and so are a perfect fit for the ever increasing number of nodes on the latest supercomputers.

"Thus, the climate community is well poised to benefit from the move towards petascale computing, and will derive the greatest benefit if all the components of future petascale systems (CPUs, interconnects, etc) are well balanced, and there is a balance between capability and capacity computing." [Cameron-Smith *et al.*, 2006, p. 350]

[489] Le SciDAC ('Scientific Discovery through Advanced Computing') est un programme du DoE, lancé en 2001. Sur son site officiel, le programme est présenté comme une extension des programmes de modélisation des projets précédents de développement informatique au DoE. Le saut quantitatif de l'échelle « téra » à « péta » n'est pas mis en avant dans la présentation générale du projet, que voici :

"SciDAC began as a five-year program by the Department of Energy (DOE) in 2001 to develop the Scientific Computing Software and Hardware Infrastructure needed to use terascale computers to advance DOE research programs in basic energy sciences, biological and environmental research, fusion energy sciences, and high-energy and nuclear physics.

"Scientific computing, including modeling and simulation, has become crucial for research problems that are insoluble by traditional theoretical and experimental approaches, hazardous to study in the laboratory, or time-consuming or expensive to solve by traditional means.

"The DOE Office of Science (SC) has a long history of accomplishments in scientific computing and has often served as the proving ground for many new computer technologies."

En 2011, le programme SciDAC est entré dans sa troisième phase de financement, avec un budget total annuel de 15,5 millions de dollars. [*Site du SciDAC*, 2014, http://outreach.scidac.gov/scidac-overview (12/03/2014) & http://www.scidac.gov/institutes.html (12/03/2014)]

d'interaction biosphérique ou entre aérosols et nuages, qui sont développés pour le modèle CCSM, afin de générer un modèle du système Terre. [...]

« Le mécanisme de chimie rapide que nous avons développé comprend 28 espèces photochimiquement actives, et vise à représenter les termes les plus grands qui rentrent en ligne de compte dans la photochimie de l'ozone troposphérique et stratosphérique, ainsi que les réactions par lesquelles les effets et rétroactions du changement global opéreront. Les familles chimiques représentées sont les espèces oxygénées radicalaires (O_x), les oxydes d'hydrogène (HO_x), les oxydes d'azote (NO_y), le méthane (CH_4) et ses dérivés oxydés, les espèces sulfurées/soufrées naturelles ou anthropiques (DMS, SO_2, SO_4), et des espèces intermédiaires. [...] En plus de notre mécanisme de chimie rapide, nous avons implémenté deux autres mécanismes chimiques [...] qui tiennent compte les hydrocarbones (les NMHC). » [Cameron-Smith *et al.*, 2006, pp. 343-346]

Dans le cinquième, et à ce jour dernier rapport du GIEC, l'AR5 ('Assessment Report n°5, 2014), on retrouve l''Earth System Model' (ESM) du NCAR/LLNL aux côtés de modèles du même type. L'AR5 marque donc l'entrée d'un niveau de complexité de modélisation supplémentaire, les 'Earth System Models' (ESM) – qu'il faut à présent prendre dans leur acception générique, et non plus comme le modèle de Cameron-Smith et collègues – dans les rapports du GIEC.

Pour quelles raisons en est-on venu à élaborer des modèles du système Terre, qui cherchent à intégrer une biogéochimie complexe ? Voici les principaux :

- Tout d'abord, l'avènement des ESM a été rendu possible par l'augmentation de la puissance des ordinateurs.[490] En définitive, l'AR5 peut se vanter de présenter des ESM qui ont des résolutions fines, comparables à celles des AOGCM : de l'ordre de 1 ou 2 degrés de latitude-longitude pour la composante atmosphérique, et de 1 degré environ pour l'océan ; et, avec un nombre typique de couches atmosphériques égal à 30-40 environ, et un nombre de couches océaniques égal à 30-60 environ. Néanmoins, les auteurs de l'AR5 constatent que l'amélioration de la résolution des modèles depuis l'AR4, qui est, affirment-ils, « à imputer à la mise à disponibilité croissante d'ordinateurs plus puissants », a été « modeste ». Elle a, de plus, était principalement limitée aux simulations à court terme, pour lesquelles certains modèles de l'AR5 « descendent à 0,5 degré pour la composante atmosphérique, dans certains cas ». Certes, la progression de la puissance des ordinateurs n'avait pas été spectaculaire entre 2007 et 2014. Mais, l'autre raison de la limitation de l'affinement des modèles tient dans le fait qu'une intégration

[490] Et, en retour, l'augmentation de la puissance des ordinateurs a, bien sûr, contribué à l'épanouissement de la Science du Système Terre.

croissante tend à générer de plus grandes incertitudes. Ainsi, « pour les modèles utilisés dans les simulations à long terme avec une biogéochimie interactionnelle, écrivent les auteurs de l'AR5, la résolution n'a pas pu être accrue de manière substantielle, du fait du compromis ('trade-off') nécessaire [de la pertinence des résultats] avec la plus grande complexité de tels modèles » [*IPCC (WG I)*, 2014, p. 753]. Nous reviendrons sur cette question de compromis.

- Deuxième facteur ayant poussé au développement de modèles du Système Terre : l'étoffement d'une Science transdisciplinaire du Système Terre, encouragé par une élite des sciences de l'atmosphère et du climat, des océanographes et des biologistes, à partir des années 1980. Comme nous l'avons expliqué dans le Chapitre 6, cette science du Système Terre place les cycles biogéochimiques au cœur de son ontologie, et se focalise principalement sur leurs dérèglements d'origine anthropique. La chimie atmosphérique globale a un rôle à jouer dans l'élaboration de cette science systémique voulue holiste (d'un point de vue "sciences de la nature" et "global"). Nous voyons les premiers frémissements de la science du Système Terre dans les années 1980 (voir Chapitre 6). Après une dizaine d'années de programme *IGBP* et autres initiatives semblables, la fin de la décennie 1990 verra la consécration de la Science du Système Terre.
- Enfin, écrivent les auteurs de l'AR5, « la transition d'AOGCM à des ESM fut motivée en partie par les résultats de la première génération de modèles couplés climat-cycle du carbone, qui ont suggéré que les rétroactions entre le climat et le cycle du carbone étaient incertaines mais potentiellement très importantes dans le contexte du changement climatique au 21ème siècle ». L'essentiel de l'effort fut consenti au sein de l'exercice d'intercomparaison C4MIP ('Coupled Climate Carbon Cycle Model Intercomparison Project' ; IGBP/WCRP), initié en 1995, et qui se veut l'une des déclinaisons, pour les modèles incluant le cycle interactionnel du carbone, de la procédure d'intercomparaison des modèles AOGCM (CMIP ; 'Coupled Model Intercomparison Project') mise en place la même année, dans la lignée de l'exercice d'intercomparaison des modèles (A)GCM initiée en 1990 par AMIP ('Atmospheric Model Intercomparison Project'). [*IPCC (WG I)*, 2014, p. 792]

Les ESM n'arrêtent toutefois pas leur intégration au cycle du carbone. Aux côtés des « changements de couverture et d'utilisation des sols », de « la dynamique globale de la végétation et des feux de forêt », du « cycle du méthane et du permafrost », « l'incorporation de représentations des aérosols plus complètes sur le plan physique », des « couches de glace terrestre » et des « nouvelles caractéristiques du couplage océan-atmosphère » (flux turbulents de chaleur, effet des courant océaniques de surface, *etc.*), on retrouve la chimie

atmosphérique, sous deux formes : « les interactions chimie-climat » et « le couplage stratosphère-troposphère ». [*IPCC (WG I)*, 2014, « 9.1.3.2. New Components and Couplings : Emergence of Earth System Modelling », pp. 751-753]

Toutefois, la tentative de complexification des modèles de CC telle que celle qu'entreprennent Cameron-Smith et ses collègues – dont la modélisation du CC futur est l'objectif principal clairement affiché dès le départ –, et la subséquente intégration des ESM dans l'AR5, *ne doit pas laisser penser que ce tropisme vers des modèles toujours plus "exhaustifs ('comprehensive')" suit quelque irrémédiable "sens de l'Histoire"*. En effet, l'intégration de nouveaux paramètres dans les modèles génère de nouvelles divergences entre les résultats obtenus. La complexité des modèles n'est pas seulement limitée sur un plan technologique, par la puissance des ordinateurs) mais également sur un plan épistémologique, dans la mesure où la complexification des modèles rime avec *des incertitudes croissantes et/ou des anomalies de résultats plus nombreuses*.[491] Un témoignage de la nécessité de compromis entre complexité et cohérence/faible incertitude des résultats est le développement, au début des années 2000, de modèles *du Système Terre « de complexité moyenne »*, les EMIC ('Earth system Models of Intermediate Complexity'), parallèlement aux modèles plus intégrateurs dits du Système Terre, les ESM.

Dans l'AR5, on se retrouve en définitive en présence de *quatre catégories de modèles globaux* utilisés pour modéliser le climat futur. Soit, par ordre de complexité croissant :

(i) Les « modèles climatiques simples » (SCM, 'Simple Climate Models'). Par exemple, le modèle MAGICC ('Model for the Assessment of Greenhouse-gas Induced Climate Change') ou les 'Energy Balance Model' (EBM), qui sont des modèles 0-D ('box models').[492]

(ii) Les EMIC ('Earth system Models of Intermediate Complexity'). Dans le TAR, si l'acronyme « EMIC » apparaît dans l'« Appendice V. Acronymes et abréviations », aucune simulation d'EMIC n'est mentionnée explicitement dans le rapport. Une dizaine d'EMIC sont cités dans l'AR4, une quinzaine dans l'AR5. Les EMIC sont des modèles du Système Terre de complexité moyenne. En cela, ils cherchent à intégrer quelques représentations de cycles biogéochimiques, en

[491] Cette intégration croissante complique également *l'organisation des collaborations scientifiques*, puisque le nombre de chercheurs augmente, et leur origine disciplinaire se diversifie. Toutefois, cet argument revient rarement sous la plume des modélisateurs de la chimie atmosphérique globale, et les rapports du 'Working Group I' du GIEC n'en font pas mention. Un élément d'explication : les développeurs des modèles de chimie de l'atmosphère globale travaillent souvent dans les mêmes laboratoires que les développeurs de modèles (AO)GCM – lorsqu'il ne s'agit pas tout simplement des mêmes individus.

[492] MAGICC et quelques autres SCM sont aujourd'hui mis gratuitement à disposition des internautes, au même titre que des modèles pouvant être utiles aux agriculteurs, ainsi que des modèles pour estimer l'évolution des ressources en eau ou des écosystèmes. Voir par exemple http://sedac.ciesin.columbia.edu/aiacc/toolkit.html (15/02/2014)

plus des dynamiques et paramétrisations des circulations atmosphériques et océaniques. En contrepartie, ils possèdent en général une résolution spatiale réduite. Ces modèles sont la plupart du temps utilisés pour étudier les effets du couplage de composantes du Système Terre, sur le long, ou le très long terme, et avec des mailles de taille importante. La plupart des EMIC utilisés dans l'AR4 (MoBiDiC, ECBilt-CLIO, Climber2, Uvic, *etc.*), ainsi que dans l'AR5, le sont pour simuler les évolutions du climat sur de longues temporalités, de l'ordre d'un ou deux millénaires voire au-delà (pour "prolonger" les récits de la paléoclimatologie dans l'avenir). D'autres EMIC sont chargés d'estimer les changements climatiques propres à de grandes régions du globe, sur des échelles de temps de l'ordre de cent ans à quelques siècles. [*IPCC (WG I)*, 2001, p. 862 ; *IPCC (WG I)*, 2007 ; *IPCC (WG I)*, 2014 ; IPCC (WG I), 2007, « Box TS.8 », p. 67]

(iii) Les AOGCM. Par exemple, le CCSM3 des NCAR et LLNL est cité dans l'AR4 et l'AR5 ; et le CCSM4, une variante de CCSM3, figure dans l'AR5.

(iv) Les ESM.

En différents lieux du rapport, les auteurs de l'AR4 expliquent leur démarche : ils jugent nécessaire d'avoir à leur disposition « un spectre de modèles de niveaux de complexité différents, chacun étant optimal pour répondre à des questions spécifiques. Ceci n'a pas de sens de juger un niveau de complexité comme étant meilleur ou plus mauvais qu'un autre, indépendamment du contexte d'étude », insistent-ils [*IPCC (WG I)*, 2001 ; *IPCC (WG I)*, 2007, « 8.8. Representing the Global System with Simpler Models », pp. 643-647].

Nous ne pouvons entrer ici dans les détails des apports et limites de chaque groupe de modèles. Nous énoncerons simplement les principales vertus des SCM et des EMIC que retenaient les experts du GIEC en 2007. En raison du nombre moins important de paramètres qu'ils prennent en compte, soulignent les auteurs, il est plus pertinent de comparer des SCM et des EMIC entre eux, que des AOGCM ou des ESM. Et, plus pertinent de comparer leurs modélisations réalisées avec les différents scénarios. Les SCM et les EMIC, écrivent les auteurs du « résumé technique » de l'AR4, « permettent [le plus souvent] la comparaison de « la réponse incertitude ('uncertainty response') » qui résulte de l'incertitude de chaque paramètre du modèle, avec la « gamme [de résultats de modélisation] » obtenus par [l'application aux modèles d']une gamme de scénarios d'émissions considérée ». En d'autres termes, on peut, en comparant les SCM et les EMIC, identifier les paramètres particuliers modélisés efficacement par les différents modèles, et ceux qui le sont moins, et donc converger vers une gamme de projections du climat futur plus restreinte qu'avec des AOGCM et des ESM ultra-intégrés (pour lesquels on peut difficilement comparer les paramètres un à un). Les SCM et les EMIC, jugent les auteurs de l'AR4, « sont bien adaptés à

la production de projections probabilistes du climat futur. » [*IPCC (WG I)*, 2001, p. 862 ; IPCC (WG I), 2007, « Box TS.8 », p. 67]

L'arrivée de nombreux ESM dans l'AR5 ne pousse nullement les autres modèles vers la sortie. Nous y retrouvons les AOGCM CCSM3 et CCSM4 (une variante de CCSM3) du NCAR/LLNL, aux côtés des ESM développés conjointement par ces mêmes institutions. Certes, à l'inverse de la plupart des AOGCM et des EMIC, les ESM peuvent se prévaloir d'intégrer une biogéochimie complexe, dont la chimie atmosphérique de l'ozone, des composés soufrés et des composés azotés, comme l'ESM de Cameron-Smith et collègues, et ses successeurs. En tout cas, s'y essaient-ils, car ceci n'est pas systématique : les auteurs du « Chapitre 9. Evaluation des modèles climatiques » de l'AR5 citent cinq modèles dits « ESM1 » estampillés « NSF-DoE-NCAR », mais ils signalent que deux d'entre eux uniquement modélisent la chimie atmosphérique (l'un des deux étant le « CESM1 (FAST-CHEM) », dont les premiers développements avaient été réalisés par Cameron-Smith et ses collègues au milieu des années 2000) [*IPCC (WG I)*, 2014, pp. 855-856]. En outre, les ESM ne constituent nullement le cœur de l'expertise du cinquième rapport du GIEC, et en tout cas nullement l'outil de référence pour informer les décideurs politiques – pas plus que l'intégration de la chimie de l'atmosphère n'est un atout décisif pour être coopté par le GIEC. Dans l'AR5, les AOGCM, et plus rarement les EMIC et les modèles climatiques simples, demeurent les modèles de référence pour estimer la hausse de la température moyenne de l'atmosphère et l'élévation du niveau des océans, c'est-à-dire les deux phénomènes du CC les plus mis en avant dans les négociations internationales sur le CC. Quant à la hausse de la fréquence des évènements météorologiques et climatiques extrêmes pouvant être dus aux émissions de GES (vagues de chaleur, sécheresses et inondations, cyclones, *etc.*), autre thématique devenue nodale pour les décideurs politiques, elle est estimée à l'aide d'un panel plus divers de modèles, ainsi que divers outils statistiques.[493] [*IPCC (WG I)*, 2014, « Summary for Policy makers » & « Technical Summary, pp. 1-127, p. 13 & « 10.3.6 Future Changes in Weather and Climate Extremes », pp. 782-788]

[493] Dans leur section sur les « changements futurs des extrêmes météorologiques et climatiques », les auteurs du Chapitre 10 écrivent :

> « Les projections de changements futurs dans les extrêmes comptent sur un ensemble de modèles et des techniques statistiques de plus en plus sophistiqués. Les études expertisées dans cette section s'appuient sur des ensembles multi-membres (trois à cinq membres) de modèles individuels, sur des analyses d'ensembles multi-modèles allant de 8 à 15 (voire plus) AOGCM, ainsi que sur un modèle unique de 50 membres, avec des couches mélangées et des perturbations physiques. La discussion vise ici à identifier des caractéristiques générales de changements dans les extrêmes, dans un contexte global. » [*IPCC (WG I)*, 2014, « 10.3.6 », p. 782]

Nous ne reviendrons pas sur la genèse scientifique des modélisations sur les « extrêmes météorologiques et climatiques », dans la mesure où elle n'implique guère à ce jour les chimistes de l'atmosphère. L'estimation des « extrêmes météorologiques et climatiques » se fait aujourd'hui de manière presque totalement indépendante de la thématique des déséquilibres chimiques régionaux (smog, *etc.*) et globaux (destruction de la couche d'ozone).

Des CCM couplés stratosphère-troposphère

Quelles sont les nouvelles intégrations de la chimie atmosphérique dans les modèles globaux des quatrième et cinquième rapports du GIEC ? Les auteurs de l'AR5 insistent, tout d'abord, sur le fait que « l'impact du trou d'ozone et sa réparation dans l'Hémisphère sud, ainsi que les effets des changements en vapeur d'eau stratosphérique sur la température, ont été confirmés par de multiples études », en particulier dans le cadre du sous-programme SPARC-CCMVal (SPARC-'Chemistry-Climate Model Validation Activity') sur les modèles couplés CCM, et bien sûr dans le cadre du travail des experts des *Ozone Assessments* que nous avons décrit dans le premier Sous-chapitre. Plusieurs CCM et ESM ont tenté d'intégrer une chimie stratosphérique. « La principale avancée depuis [l'époque de rédaction de] l'AR4, estiment les auteurs de l'AR5, tient dans l'utilisation à présent presque généralisée de taux d'ozone stratosphérique qui varient en fonction du temps, plutôt que de taux fixes. » Tous les modèles évalués par le principal programme d'intercomparaison de l'AR5, le CMIP5, « prennent en compte la destruction de l'ozone stratosphérique et saisissent les effets associées sur le climat de surface de l'hémisphère sud ». « Dans la majorité des simulations validées par le CMIP5, l'ozone stratosphérique est [seulement] prescrit ('prescribed') », c'est-à-dire "non-couplé", "calculé hors modèle", sur une base plus ou moins empirique, puis imposé comme contrainte (ou « forçage ») au modèle.

Ce n'est pas toujours le cas, néanmoins, puisque neuf modèles CMIP5 « traitent la chimie stratosphérique de manière interactionnelle, et calculent donc leurs propres évolutions d'ozone ». Certains modèles de l'AR5, tels que certaines versions du modèle de la NASA GISS-E2, « incluent une chimie interactionnelle "complète" de l'ozone dans les simulations historiques et du futur, et une chimie interactionnelle du méthane pour les simulations du futur [Shindell *et al.*, 2013, p. 2653]. » En outre, les échanges stratosphère-troposphère sont simulés par la grande majorité des modèles. Notamment parce que, parmi les « interactions chimie-climat d'importance » qui ont été identifiées par les scientifiques, il a été montré que « des afflux croissant d'ozone stratosphérique dus à un climat plus chaud induiraient un plus lourd fardeau d'ozone dans la troposphère. » [*IPCC (WG I)*, 2014, pp. 752-753 & 774]

Par ailleurs, les auteurs de l'AR5 ont dénombré, parmi les modèles du CMIP5, dix modèles qui simulent les interactions chimiques troposphériques, alors qu'elles sont "prescrites" dans les autres (les chiffres sont donc semblables à la chimie stratosphérique, simulée par dix modèles CMIP5, et "prescrite" par les autres). Les modélisateurs ont cherché à intégrer plus avant la chimie multi-phase aérosols-gaz, par exemple la formation des aérosols soufrés et

les mécanismes aérosols-nuages. Mais, les auteurs de l'AR4 reconnaissent que, malgré l'addition des interactions aérosols-nuages dans de nombreux AOGCM et ESM depuis l'AR4, et de la chimie des aérosols dans certains, « la représentation des particules aérosols, et leur interaction avec les nuages et leur transfert radiatif restent une source importante d'incertitude » [*IPCC (WG I)*, 2014, pp. 752-753]. Par ailleurs, l'effort de modélisation de la photochimie de l'ozone troposphérique et du méthane (et des NMHC, de l'OH, *etc.*), initié en amont du TAR, a été poursuivi en aval avec vigueur.

Les auteurs de l'AR5 mettent tous les indicateurs au rouge. « Après une décennie de quasi-stabilité, écrivent-ils dans le Résumé technique, la récente augmentation des concentrations de CH_4 a conduit à une forçage radiatif (RF, 'Radiative forcing') de +2% par rapport à l'AR4, pour atteindre 0,48 [0,43 à 0,53] W.m^{-2}. Il est *très probable* que le forçage radiatif du CH_4 est à présent plus important que celui de l'ensemble des halocarbones réunis. »[494] Le N_2O atmosphérique a augmenté de 6% depuis l'AR4, provoquant un forçage radiatif de 0,17 [0,14 à 0,20] W.m^{-2}. » Quant à l'ozone troposphérique, il représente « un forçage radiatif total de 0,50 [0,30 à 0,70] W.m^{-2} attribué aux émissions de précurseurs d'O_3 troposphérique (alors qu'un forçage radiatif négatif, égal à -0.15 [-0.30 à 0.00] W.m^{-2} est associé à la destruction de l'ozone stratosphérique par les halocarbones) » (voir Figure 47 ci-dessous). [*IPCC (WG I)*, 2014, pp. 53-54]

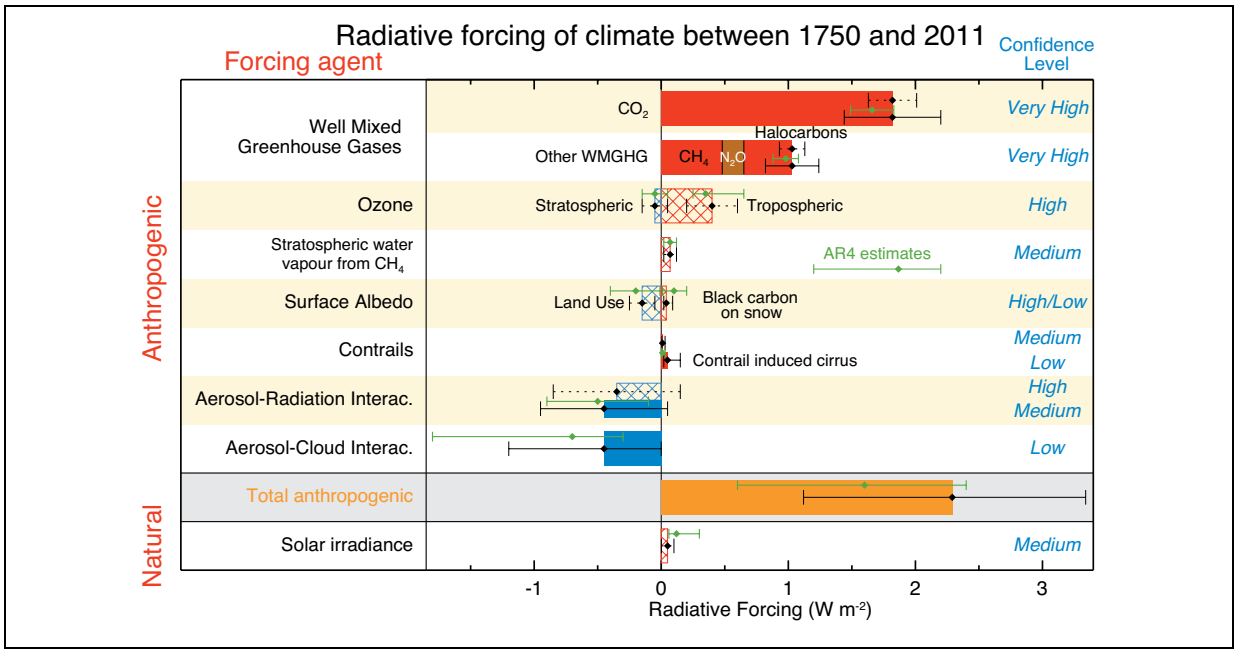


Figure 47 : Forçages radiatifs dus aux changements anthropiques et naturels entre 1750 et 2011, avec leurs barres d'incertitudes associées
[*IPCC (WG I)*, 2014, « Figure TS.6 (top) », p. 54]

[494] En outre, précisent les auteurs plus loin, « le forçage radiatif de la vapeur d'eau stratosphérique produite par l'oxydation du CH_4 s'élève à 0,07 [0,02 à 0,12] W.m^{-2}. » En précisant que « les autres changements de vapeur d'eau stratosphérique, et tous les changements de vapeur d'eau dans la troposphère, sont considérés comme une rétroaction ('a feedback') plutôt qu'un forçage. » [*IPCC (WG I)*, 2014, p. 55]

Dans l'AR4 et l'AR5, nous retrouvons "naturellement" certains auteurs "pionniers" du Chapitre 4 du TAR (Hauglustaine, Brasseur, Mickley, Prather, Solomon, Daniel). Notons, par ailleurs, pour l'Europe, l'importance jouée par le consortium EDGAR (Emission Database for Global Atmospheric Research ; UE), qui avait permis de compiler les tendances d'émissions de précurseurs d'ozone anthropique à partir de 1990, ainsi que par l'intercomparaison de dix modèles globaux de chimie troposphérique menée sous les auspices d'ACCENT ('Atmospheric Composition Change : an European Network'), en amont de l'AR4 [*IPCC (WG I)*, 2007, pp. 150-151]. En France, le modèle atmosphérique de référence utilisé dans l'AR4 est le modèle couplé LMDz-INCA (Laboratoire de Météorologie Dynamique GCM-Interactive Chemistry and Aerosols model), développé par les laboratoires LMD et LSCE de l'IPSL, et Météo France, que nous avions pris pour exemple dans l'introduction de ce Sous-chapitre [*IPCC (WG I)*, 2007, p. 549]. Didier Hauglustaine (LSCE, de l'IPSL) fait partie des développeurs impliqués dans le projet.[495]

Dernier point, au sujet des échelles de temps. Dans la grande majorité des cas, la chimie atmosphérique est mobilisée dans les modélisations à petite échelle spatio-temporelle (de quelques années à quelques décennies), comme dans les cas évoqués ici (ozone, méthane, aérosols). Nous retrouvons également une chimie atmosphérique, plus rudimentaire, dans des modèles à plus grande échelle temporelle (des EMIC pour la plupart). Elle se limite presque exclusivement à la couche d'ozone, dont le potentiel de "reconstruction" doit être estimé sur de nombreuses décennies, voire plusieurs siècles. Dans les longs récits climatiques, les aérosols jouent eux aussi un rôle important, mais la chimie des aérosols ne peut pas être prise en compte à de telles échelles, tant les variations de quantités d'aérosols sont plurifactorielles et requièrent des modèles à haute résolution. [*IPCC (WG I)*, 2014, « Chapitres 11 & 12 »]

Action du CC sur la qualité de l'air, déterminée par 'downscaling' des modèles climatiques globaux

Nous ne détaillerons pas plus avant les intégrations de la chimie dans les modèles globaux de l'AR4 et l'AR5. Nous terminerons notre recension des rapports du GIEC sur la montée de

[495] Le chimiste de l'atmosphère Didier Hauglustaine a soutenu en 2004 son Habilitation à Diriger des Recherches (HDR) sur la « Modélisation globale de l'évolution de l'ozone troposphérique sous l'effet des activités humaines et de son impact sur le climat » (Hauglustaine, 2004). Ajoutons que, la même année, il a publié un ouvrage de vulgarisation aux Editions Le Pommier, *Climat, chronique d'un bouleversement annoncé*, aux côtés de deux des scientifiques du changement climatique les plus reconnus par la communauté scientifique française et les plus présents dans les médias français : le glaciologue et climatologue Jean Jouzel ; Hervé Le Treut, climatologue, et en particulier modélisateur précoce du climat en France (dès la fin des années 1970), et membre de l'Académie des Sciences depuis 2005 (Hauglutaine *et al.*, 2004).

la thématique *des rétroactions entre qualité de l'air et changement climatique*, au cours des années 2000-début 2010. Il faut opérer une distinction entre deux aspects de la problématique.

Le premier aspect est nommé « qualité de l'air global ('global air quality') ». Nous en avons vu les prémices dans le TAR. Le rapport fait mention d'une pollution métropolitaine, principalement originaire d'Asie de l'Est et de la côte ouest des Etats-Unis, que l'on commence à retrouver dans des concentrations significatives sur l'ensemble de l'hémisphère. En particulier, l'ozone et le monoxyde de carbone, provenus de grandes agglomérations, sont détectés dans « l'air de fond ('background air') » de l'Océan pacifique. La même conclusion s'impose pour l'Océan atlantique nord, avec un apport nord-américain voire européen, cette fois-ci.[496] Dès le TAR (2001), les auteurs du GIEC affirment qu'il a été montré que « les émissions de NO_x influencent la photochimie à une échelle hémisphérique ». Des études se sont déroulées, pour certaines, sur l'ensemble de la décennie 1990. A la fin des années 1990, des collaborateurs au rapport spécial des Groupes I & III du GIEC sur « l'aviation et l'atmosphère globale » (Penner *et al.*, 1999) se sont essayés à des modélisations à l'horizon 2100. « Avec certains scénarios, l'abondance d'O_3 doublait sur les latitudes nord ». Les auteurs du TAR (2001) affirment qu'« au 21ème siècle, une perspective globale sera nécessaire pour atteindre les objectifs de qualité de l'air régional » [*IPCC (WG I)*, 2001, pp. 242 & 279].

Dans les années 2000, cette problématique est de plus en plus systématiquement nommée « qualité de l'air globale » – bien qu'elle soit le plus souvent un phénomène significatif seulement à l'échelle "bi-continentale" ou hémisphérique. Elle devient également plus visible dans la littérature. Il faut comprendre « qualité de l'air » au sens large, avec ses aspects plus "environnementaux 'stricto sensu'" et ses aspects plus "épidémiologiques". Avec, comme enjeu principal, la contribution de cette « pollution de fond » globale à la pollution des régions. En effet, dans les régions avec une pollution endogène importante, le surplus de pollution apporté de l'extérieur peut parfois être suffisamment important pour induire un dépassement des seuils de qualité de l'air. Il est « établi que des émissions locales, combinées à des niveaux de fond et des conditions météorologiques propices à la formation et à l'accumulation de la pollution, produisent des épisodes extrêmes de pollution à des échelles locales et régionales » (dont les smogs urbains), écrivent les auteurs de l'AR5. [*IPCC (WG I)*, 2014, « TS.5.4.8 », pp. 88-89]

[496] En raison de la rotation de la Terre, les pollutions s'orientent très majoritairement vers l'est à l'échelle hémisphérique. Aussi, les pollutions asiatiques se dirigeront-elles majoritairement vers l'Océan pacifique, les pollutions nord-américaines vers l'Océan atlantique, et les pollutions européennes vers l'intérieur du continent eurasiatique.

L'AR5 (2014) est le premier rapport du GIEC à consacrer une section sur les « projections des changements à court terme de la qualité de l'air ». Evidemment, les auteurs reconnaissent que ce sont *les émissions de polluants* qui sont les plus problématiques pour la qualité de l'air, *et non les impacts du changement climatique sur la chimie troposphérique*. « La gamme des projections de qualité de l'air (O_3 et $PM_{2,5}$ dans l'air de surface), écrivent-ils, est conduit prioritairement par les émissions (dont le CH_4), plutôt que par des changements climatiques physiques ». De surcroît, « la réponse de la qualité de l'air aux changements induits par le climat est plus incertaine que la réponse aux changements induits par les émissions » (confiance moyenne ('medium confidence') *vs* confiance « élevée » ('high confidence')). En vérité, la réduction des pollutions dans les villes, en particulier les villes des Grands émergents, aurait un impact sur les concentrations d'O_3 global, et même de CO_2 ; l'intégration d'une section sur la qualité de l'air dans le « Résumé technique » du GIEC peut donc être vue comme une manœuvre stratégique pour encourager les réductions de GES (en particulier dans les agglomérations, qui sont des régions fortement émettrices d'O_3 et de CO_2), plutôt que comme une expertise projective des impacts du changement climatique sur la qualité de l'air, qui demeure une connaissance peu robuste aux yeux des scientifiques. En tout cas, les experts économistes du GIEC tablent manifestement sur de futures réglementations de la qualité de l'air, dans les pays en développement notamment. Preuve en est, « les nouveaux scénarios » dits RCP ('Representative Concentration Pathways'), utilisés dans l'AR5 parallèlement aux traditionnels SRES (issus du 'Special Report on Emission Scenarios (SRES) du GIEC de 2000), intègrent les réglementations des pollutions de l'air à venir (et, « en conséquence, la pollution de l'air projetée à échelle continentale est plus faible sous les scénarios RCP que sous les scénarios SRES ('confiance élevée') », écrivent les auteurs). [*IPCC (WG I)*, 2014, TS.5.4.8, p. 88][497]

Toutefois – et il s'agit là de notre second aspect de la thématique des rétroactions entre qualité de l'air et changement climatique –, *certaines projections des impacts du changement climatique sur la chimie troposphérique régionale ont bel et bien été réalisées*. Nous trouvons un encadré sur « les effets du changement climatique sur la qualité de l'air » dans l'AR4. Il cite L. Mickley et D. Hauglustaine, qui avaient contribué à la rédaction du Chapitre 4 du TAR. Il y est rapporté que « les conditions de températures anormalement élevées et de stagnation anormale des pollutions au cours de l'été 1988 avaient été responsables des concentrations d'ozone les plus importantes enregistrées dans le nord-est des Etats-Unis [, et que] la canicule en Europe en 2003 avait été accompagnée de concentrations en ozone

[497] L'AR5 cite l'article : Anenberg S. C. *et al.*, 2012, "Global Air Quality and Health Co-benefits of Mitigating Near-Term Climate Change through Methane and Black Carbon Emission Controls", *Environmental Health Perspectives*, 120, pp. 831-839. Nous revenons sur ces « co-bénéfices qualité de l'air/changement climatique » dans le Chapitre 9.

exceptionnellement élevées. » Les auteurs en concluaient qu'« une variabilité interannuelle tellement élevée de l'ozone de surface corrélée à des hausses de températures démontrait les potentiels impacts que le changement climatique pourrait avoir sur la qualité de l'air au cours du siècle. » Néanmoins, reconnaissaient les auteurs de l'AR4, « peu de GCM avaient, à ce jour, étudié comment la météorologie de la pollution de l'air pouvait répondre au changement climatique futur. » De plus, les études recensées portaient presque toutes sur les États-Unis. [*IPCC (WG I)*, 2007, Box 7.4, p. 540]

La thématique des impacts du changement climatique sur la qualité de l'air est plus présente dans l'AR5, où nous la retrouvons même – certes, très succinctement – dans le « Résumé technique » pour les décideurs. Plusieurs phénomènes sont décrits. Premièrement, « globalement, le réchauffement fait décroître l'O_3 de fond en surface ('confiance élevée'). » Mais, en participant à la chimie de l'ozone, le méthane peut compenser cet effet de réduction de l'ozone. « De hauts niveaux de CH_4 (comme dans les scénarios RCP 8.5 et SRES A2) peuvent annuler cette diminution, estiment les auteurs de l'AR5, jusqu'à faire augmenter l'O_3 de fond en surface à l'horizon 2100 de 8 ppm en moyenne (soit 25% des niveaux actuels), par rapport aux scénarios avec de faibles changements en CH_4 (comme les scénarios RCP 4.5 et RCP 6.0) ('confiance élevée'). » [*IPCC (WG I)*, 2014, TS.5.4.8, pp. 88-89]

Deuxièmement, « toutes choses égales par ailleurs, les observations et modélisations indiquent que des températures de surface localement plus élevées dans des régions polluées pourraient déclencher des rétroactions régionales sur la chimie, et faire augmenter les niveaux des pics de pollution à l'ozone et aux $PM_{2,5}$ ('confiance moyenne'). » Troisièmement, outre les températures de surface plus élevées en moyenne, des évènements météorologiques "extrêmes", induits par le changement climatique, pourraient offrir des conditions météorologiques propices à la formation chimique de pollution et à l'accumulation de polluants à l'échelle locale et régionale. Toutefois, précisent les auteurs de l'AR5, « la confiance est faible dans les projections concernant des altérations des blocages ('blocking') météorologiques associés à ces épisodes extrêmes. » Quatrième et dernier point énoncé par les experts : « en ce qui concerne les $PM_{2,5}$, le changement climatique pourrait altérer les sources naturelles d'aérosols (feux de forêt, soulèvement de poussière, précurseurs des COV biogéniques), ainsi que le lessivage (par les précipitations) ; mais, aucun niveau de confiance n'a pu être attribué à l'impact global du changement climatique sur les distributions en $PM_{2,5}$. » [*IPCC (WG I)*, 2014, TS.5.4.8, pp. 88-89]

Afin d'estimer l'effet du changement climatique sur les mécanismes de réaction physico-chimique entre pollutions à l'échelle régionale, les scientifiques utilisent des techniques dites de « 'downscaling' (régional) ». Ils utilisent, soit des méthodes de 'downscaling' empiriques et statistiques, soit des modèles climatiques régionaux (RCM,

'Regional Climate Models'). Nous voici en présence du cinquième type de modèle recensé dans le dernier rapport du GIEC (les quatre autres étant, rappelons-le : les SCM, les EMIC, les (AO)GCM et les ESM). Les RCM, écrivent les auteurs de l'AR5, sont « des modèles géographiquement circonscrits, qui représentent des processus climatiques comparables à ceux des composantes "atmosphère" et "sols" des AOGCM, mais dont sont généralement exclus les phénomènes liés aux océans et à la glace de mer. Les RCM sont souvent utilisés pour 'downscaler' dynamiquement les simulations de modèles globaux pour des régions particulières, afin de fournir des informations détaillées. […] Depuis l'AR4, précisent les auteurs, la résolution des modèles régionaux climatiques est passée, typiquement, de 50 km à 25 km ». Des simulations régionales intégrant les effets du changement climatique ont pu être réalisées pour le court terme, à l'horizon de deux ou trois décennies, typiquement, voire jusqu'à 2100. [*IPCC (WG I)*, 2014, pp. 748, 753 & "11.3.5. Projections for Atmospheric Composition and Air Quality to 2100", pp. 996-1004]

Pour conclure, la place de la chimie atmosphérique dans les modèles numériques du GIEC reste aujourd'hui limitée. Les chercheurs peinent à intégrer la chimie troposphérique et stratosphérique dans les modèles numériques de circulation générale (AOGCM), dont les simulations forment pourtant le cœur des expertises du GIEC, puisqu'ils fournissent les projections des phénomènes les plus mis en avant dans les résumés à l'attention des décideurs politiques (hausse de la température globale moyenne de l'atmosphère, élévation du niveau des océans, *etc.*). Les incertitudes restent grandes, notamment en ce qui concerne l'action radiative des aérosols, à l'intérieur comme à l'extérieur des nuages. Plus généralement, le changement climatique demeure une thématique mineure pour la plupart des chimistes de la troposphère, dont la majorité travaillent sur les pollutions urbaines.

Toutefois, la chimie troposphérique est montée en échelle au cours des trois dernières décennies, au point de devenir pertinente pour la science du changement climatique. Des cartographies dynamiques de concentrations globales d'ozone troposphérique sont apparues dans la littérature au cours de la décennie 2000. En outre, la thématique des « liens ('linkages') » entre changement climatique et chimie troposphérique s'est développée, dans la lignée notamment des travaux de Paul Crutzen et du physicien de l'atmosphère russe Georgy S. Golitsyn, qui avaient signé dès 1992 un chapitre intitulé "Linkages between Global Warming, Ozone Depletion, Acid Depletion, Acid Deposition and Other Aspects of Global Environmental Change" dans l'ouvrage collectif *Confronting Climate Change – Risks, Implications and Responses* [Crutzen & Golitsyn, 1992]. Et, à partir du tournant des années 2000, à la croisée des chemins de la thématique du changement climatique, de la

pollution de l'air, des pluies acides et de l'ozone stratosphérique, des tentatives ont été effectuées pour prédire les évolutions des concentrations d'ozone, de NO_x, de carbone suie et de méthane, à court et moyen terme, à l'aide de modèles tridimensionnels. Voire, pour modéliser une chimie interactionnelle corrélée au changement climatique, dans les modèles globaux AOGCM et ESM.

L'intégration de la chimie s'est faite sous l'impulsion de chercheurs issus de trois traditions : la destruction de l'ozone stratosphérique, les pluies acides et la qualité de l'air – avec certains d'entre eux faisant des allers et venus entre ces trois thématiques, souvent au gré des déplacements d'intérêt des scientifiques, des médias et des décideurs politiques. Dans les années 1990, la plupart des études chimie-climat avaient été réalisées en Amérique du nord et en Europe, par des chercheurs indigènes. Plus récemment, des études ont été menées en Asie de l'est, et en particulier en Chine. Des coopérations ont vu le jour entre chercheurs états-uniens et européens, et chercheurs chinois, notamment autour des « mégacités » (par exemple Schleicher et ses collègues ont publié la synthèse de leurs travaux sur la « Mégacité Pékin » dans Schleicher *et al.*, 2013).

En 2012, l'OMM et l'ICSU ont rendu un long rapport commun sur les *Impacts des Mégacités sur la Pollution de l'air et le Climat* [*WMO/IGAC*, 2012]. Auparavant, deux programmes conjoints avaient été menés en Europe sur les mégacités, entre 2008 et 2011, financés par la Commission européenne : MEGAPOLI ('Megacities: Emissions, urban, regional and Global Atmospheric POLlution and climate effects, and Integrated tools for assessment and mitigation'), coordonné par l'Institut météorologique danois ; CitiZen, coordonné par l'Institut météorologique norvégien. Mais, comme nous le confiait Matthias Beekmann du LISA (Laboratoire Interuniversitaire des Systèmes Atmosphériques ; Créteil, France), chimiste de l'atmosphère travaillant principalement sur la pollution de l'air francilien et ayant participé à MEGAPOLI, de tels programmes avaient obtenu de meilleurs résultats pour comprendre les rétroactions entre pollutions et climat régional qu'entre pollutions et climat global. Sous l'impulsion de MEGAPOLI, M. Beekmann souhaitait avant tout obtenir, à terme, « *pour l'échelle régionale (nous soulignons)*, des bases de données fines sur les propriétés chimiques et physico-chimiques de l'aérosol, en vue de valider des modèles de chimie-climat à l'échelle régionale. » [Beekmann, 2011, entretien avec l'auteur, Créteil (le 26 juillet 2011)]

Chapitre 9. De l'importance climatique des GES de courte durée de vie et des émissions soufrées

Dans le Chapitre 8, nous avons décrit l'émergence de la thématique des rétroactions entre changement climatique et chimie stratosphérique, dans les 'Scientific Assessments of Ozone Depletion' et les rapports du GIEC. Nous avons également montré que le changement climatique et la chimie troposphérique, et en particulier la chimie des pollutions urbaines, sont couplés de manière plus fréquente dans les modélisations depuis la fin des années 1990, y compris dans les rapports du GIEC.

Le présent Chapitre 9 porte également sur l'interface changement climatique - chimie atmosphérique. Il prolonge les analyses du Chapitre 8 au-delà des grands rapports d'expertise internationaux sur l'ozone et le climat. Il explore des problématiques nouvelles aux implications politiques potentiellement importantes, mises en avant par de grandes figures de la chimie atmosphérique (S. Solomon, P. Crutzen). La montée en puissance de ces thématiques résulte de la complexification des savoirs des chimistes de l'atmosphère et des scientifiques du changement climatique, mais aussi de la nécessité, présentée comme impérieuse à partir des années 2000, de réfléchir à des modes de gouvernement des pollutions qui (a) renforceraient les efforts politiques de réduction des émissions de composés atmosphériques hors-CO_2 contribuant au changement climatique, et (b) coupleraient plusieurs problématiques de pollution atmosphérique jusqu'alors réglementées de manière indépendante.

Les GES de faible durée de vie, en particulier, ont été jetés sur le devant de la scène scientifique et politique. D'une part, des réductions rapides de ces GES aux temps de résidence dans l'atmosphère plus faibles que le CO_2 (en moyenne, de l'ordre de la journée à une ou plusieurs décennies) pourraient permettre d'*obtenir un effet rapide de limitation du réchauffement climatique*. D'autre part, la réduction d'un polluant de faible durée de vie (par exemple, l'ozone troposphérique ou le carbone suie) peut avoir des effets bénéfiques sur plusieurs aspects environnementaux, en particulier sur la qualité de l'air urbain *et* le climat. On parle alors de "*co-bénéfice*". Dans le cas contraire où une action politique générera des effets environnementaux, bénéfiques pour certains, néfastes pour d'autres (par exemple, des mesures politiques de réduction des particules sulfatées amélioreraient la qualité de l'air

dans les villes mais accentueraient le processus de réchauffement climatique), un "*dilemme*" se pose.

Dans leur « résumé technique » à l'attention des décideurs, les experts du cinquième rapport du GIEC n'abordent pas les problématiques des GES de courte durée de vie et des dilemmes / co-bénéfices des politiques de pollution atmosphérique [*IPCC (WG I)*, 2014, pp. 33-115]. Les auteurs de l'AR5 accèdent à ces thématiques "par la bande", en plusieurs lieux du rapport. Ils affirment ainsi que

> « les réductions d'émissions visant à diminuer la pollution de l'air local pourraient avoir un impact à court terme sur le climat ('confiance élevée'). Les polluants de l'air à courte durée de vie ont des effets opposés : refroidissement pour les sulfates et les nitrates ; réchauffement pour les aérosols de carbone suie (BC), le monoxyde de carbone (CO) et le méthane (NH_4). Des réductions d'émissions de CH_4 anthropiques de 25%, introduites progressivement d'ici à 2030, diminueraient l'ozone en surface et réduiraient le réchauffement moyen entre 2036 et 2045 de 0,2°C environ ('confiance moyenne'). Des réductions de 78% de carbone suie et des espèces co-émises avec lui, combinées à des réductions de méthane de 24%, réduiraient le réchauffement ('confiance faible') ». [*IPCC (WG I)*, 2014, p. 955]

Et, ils schématisent les possibles co-bénéfices et dilemmes des politiques de pollution atmosphérique, dans un encadré intitulé « Les améliorations de qualité de l'air ont-elles un effet sur le changement climatique ? » (voir Figure 48 ci-dessous)

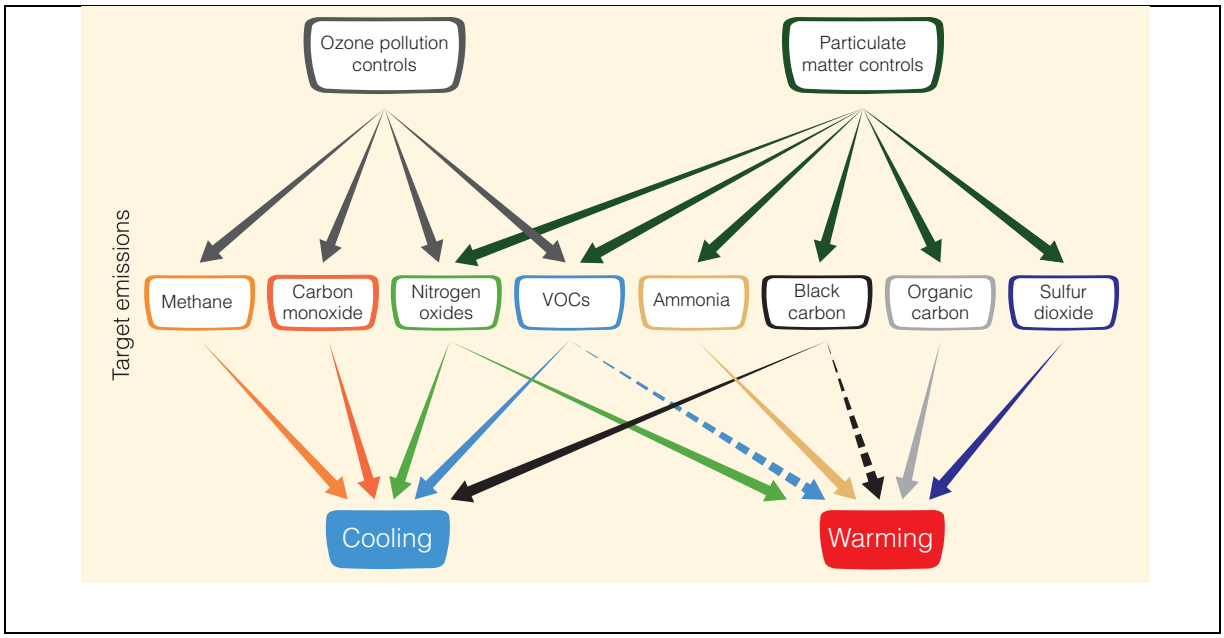


Figure 48 : Schéma de l'impact climatique (refroidissement ou réchauffement) de réductions d'émissions de gaz et d'aérosols à faible temps de résidence dans l'atmosphère, d'après le cinquième rapport du GIEC (2014)
Les flèches pleines indiquent des effets « connus » ; les flèches en pointillés, des effets « incertains ». [*IPCC (WG I)*, 2014, « FAQ 8.2, Figure 1 », pp. 684-685]

Nous l'aurons compris, la recherche d'effets climatiques rapides de politiques de réduction des polluants et la recherche de co-bénéfices forment les deux faces d'une même problématique : *multiplier, voire hiérarchiser, les priorités de réduction* des émissions de composés atmosphériques autres que le CO_2 afin de circonscrire le réchauffement climatique dans les décennies à venir. L'accent est mis en particulier sur les polluants *de faible durée de vie atmosphérique* (O_3, NH_4, NO_x, aérosols soufrés, *etc.*), dans la mesure où leur limitation pourrait avoir un impact rapide sur le climat.

Dans un premier sous-chapitre, nous montrons que des scientifiques de l'atmosphère, dont la chimiste Susan Solomon, participent à l'élaboration de ces suggestions. Ils cherchent, "au pire", une manière de gagner du temps dans l'attente de politiques ambitieuses de réduction du CO_2, et, "au mieux", à enclencher une dynamique générale plus ambitieuse de réglementation des GES, CO_2 compris. Les auteurs des articles que nous analysons justifient explicitement leur démarche par le contexte de morosité des négociations internationales sur les réductions d'émissions de CO_2, qui pousse à inventer de nouveaux chemins de lutte contre les émissions de GES. Pour ces auteurs, le Protocole de Kyoto est devenu synonyme d'échec, alors qu'ils désignent, de nouveau, le Protocole de Montréal comme le modèle à suivre. Leur appel se fait, en outre, au nom de la perspective probable de désastres climatiques à moyen terme, que la réglementation des GES de courte durée de vie pourrait éviter.

Dans un Sous-chapitre 9.2, nous analysons les discours sur le dilemme que présenteraient les aérosols soufrés, qui posent un problème de santé publique mais tendent dans le même temps à contrebalancer l'effet réchauffant des GES.

9.1. Réduire des émissions de GES de courte durée de vie afin de se maintenir sous les « +2°C »

Comme nous l'avons souligné dans les Sous-chapitres 8.2 et 8.3, des rétroactions ont été établies entre ozone stratosphérique et changement climatique – même si les scientifiques restent très circonspects au sujet des corrélations établies entre tendances de concentration d'ozone et évolutions de paramètres définissant le changement climatique.[498] En outre, dès la

[498] Si l'on prend en compte les barres d'erreur, la Figure 47 du Chapitre 8 indique que le signe du forçage radiatif associé à la destruction anthropique de l'ozone global n'est pas connu [*IPCC (WG I)*, 2014, « Figure TS.6 (top) », p. 54]. Les scientifiques jugent également prématuré de dégager une tendance générale au sujet de l'impact du changement climatique sur les conditions stratosphériques, dont la destruction d'ozone, que ce soit au cours des

fin des années 1980, les deux thématiques globales ont été volontiers associées dans les arènes politiques et dans les rapports d'expertise. Le fardeau des GES est aujourd'hui en partie partagé entre le Protocole de Montréal, qui réglemente des ODS-GES comme les CFC et les HCFC, et le Protocole de Kyoto et des accords multilatéraux hors-Kyoto qui réglementent des substituts des CFC et HCFC qui ne détruisent pas l'ozone mais contribuent au réchauffement de l'atmosphère (les HFC, les SF_6 et les PFC).

Enfin, si tous les acteurs semblent aujourd'hui avoir pris conscience des limites de calquer la gouvernance climatique sur celle de l'ozone, certains ne continuent pas moins de "tirer des leçons" de la gouvernance de l'ozone, afin de proposer de nouvelles pistes d'action politique sur le changement climatique. C'est le cas des travaux discutés ici, présentés entre 2011 et 2013. Leurs deux principaux protagonistes sont des chercheurs de la NOAA (à Boulder, Etats-Unis) : John S. Daniel, et son aînée Susan Solomon. Cette dernière a connu et encouragé la signature du Protocole de Montréal et ses amendement, processus de réglementation qu'elle décrit, à l'image de la grande majorité des acteurs, comme une 'success story' [Solomon, 1999]. Depuis ses travaux sur le trou de la couche d'ozone à la fin des années 1980, l'autorité de S. Solomon est grande au sein de la communauté des sciences de l'atmosphère globale. Dans les années 1990, cette chimiste de formation a évolué vers le double statut de chimiste de l'ozone stratosphérique *et* de scientifique du changement climatique, profil que possède également son collègue J. Daniel.

La logique des paniers du Protocole de Montréal appliquée aux GES

En 2012, J. Daniel, S. Solomon, Todd J. Sanford (du 'Cooperative Institute for Research in Environmental Sciences' de Boulder), Mack McFarland (toujours chez DuPont), Jan S. Fuglestvedt (du 'Center for International Climate and Environmental Research' d'Oslo) et Pierre Friedlingstein (du 'College of Engineering, Mathematics and Physical Sciences' de l'Université d'Exeter) publient dans *Climatic Change* un court article intitulé « Limitations des échanges dans un panier unique : leçons du Protocole de Montréal pour la

dernières décennies ou pour les projections d'ozone à venir. Les experts du dernier rapport international sur l'ozone "se contentent de" mettre en avant cinq résultats :

- « on prévoit que la stratosphère moyenne et haute se refroidisse au cours du siècle, principalement à cause des hausses de dioxyde de carbone » ;
- « les modèles de chimie-climat prédisent une augmentation de la vapeur d'eau stratosphérique, mais la confiance dans ces prédictions est faible » ;
- « on prévoit que le futur rétablissement du trou de la couche d'ozone antarctique et l'augmentation des gaz à effet de serre auront un effet opposé sur le courant-jet troposphérique de moyenne latitude dans l'Hémisphère sud » ;
- « les simulations climatiques avec des forçages de gaz à effet de serre suggèrent une accélération future de la circulation stratosphérique Brewer-Dobson » ;
- « le changement de climat stratosphérique futur affectera les concentrations en ozone troposphérique ». [*WMO*/…, 2011, p. 4.2]

politique climatique ("Limitations of single-basket trading: lessons from the Montreal Protocol for climate Policy") ».[499] Les auteurs y opposent « le modèle de panier unique contrôlant l'ensemble des pollutions, qu'a adopté le Protocole de Kyoto », au « modèle des paniers multiples » du Protocole de Montréal. [Daniel *et al.*, 2012]

« Le Protocole de Montréal, rappellent-ils, a mis en place une approche à paniers multiples : chaque groupe de substances destructrices d'ozone (ODS), ou panier, est réglementé séparément ». Les CFC (CFC-11, -12, -113, -114, et -115) sont ainsi regroupés dans un même panier, les HCFC dans un second, le tétrachlorure de carbone dans un troisième, le méthylchloroforme dans un quatrième, les halons dans un cinquième, *etc.*[500] Les « choix ('trading') »[501] de réductions de production et de consommation sont autorisées pour chaque panier, mais pas entre paniers. Ainsi fonctionne le Protocole de Montréal. Or, sa capacité à protéger la couche d'ozone n'a-t-elle pas été « largement reconnue », rappelle les auteurs ? [Daniel *et al.*, 2012, pp. 241-242]

La métrique privilégiée pour comparer les ODS dans la gouvernance de Montréal est la version "statique" de l'ODP, ou « ODP en régime stationnaire ('steady state ODP') ». Un ODP(t) « qui dépend du temps » a certes également été défini, « de manière semi-empirique », en s'appuyant sur l'approximation suivante : le taux de disparition des molécules ODS dans l'atmosphère varierait linéairement en fonction de leur concentration. Mais, il n'est pas très fiable. Les règlementations du Protocole de Montréal s'appuient sur des ODP "statiques". *Par contre*, les ODS sont répartis dans *différents paniers*, qui *réunissent*

[499] Cet article fait partie d'une série de publications auxquelles ont contribué Solomon et Daniel entre 2011 et 2013, et qui se complètent. Lors de la conférence scientifique du WCRP ('World Climate Research Programme') des 24-28 octobre 2011, intitulée 'Climate Research in Service to Society', qui se tint à Denver, Susan Solomon, John S. Daniel, Raymond T. Pierrehumbert (géophysicien de l'Université de Chicago) et Damon Matthews (qui travaille sur le CC et le cycle global du carbone à l'Université de Concordia, Montréal) proposèrent un « rapport ('position paper') », qui avait pour titre « Composition atmosphérique, changement climatique irréversible et politique de mitigation ('mitigation policy') ». Deux ans plus tard, le rapport est peaufiné pour être publié, sous le même titre, dans l'ouvrage collectif *Climate Science for Serving Society. Research, Modeling and Prediction Priorities* (avec un signataire de plus, le modélisateur du système climatique et des cycles biogéochimiques Pierre Friedlingstein). L'année précédente, en 2012, Damon Matthews, Susan Solomon et Raymond Pierrehumbert avaient en outre co-signé un article dans les *Philosophical Transactions of the Royal Society A*, qui avait pour titre « le Carbone cumulé comme cadre politique pour atteindre la stabilisation du climat ». (Solomon *et al.*, 2013 ; Matthews *et al.*, 2012)

[500] Certains gaz étaient par ailleurs réglementés séparément et de manière individuelle. Par exemple, les CH_3CCl_3, les CCl_4 et CH_3Br. [Solomon *et al.*, 2013, p. 433]

[501] Le processus d'interdiction progressive des CFC s'est appuyé, dans certains pays et parfois de manière provisoire, sur un système de plafonnement et d'échanges de permis à polluer, ou « 'cap-and-trade' » (comme c'est le cas du SO_2 aux Etats-Unis depuis 1990, ou des GES dans le Protocole de Kyoto). Le terme 'trading', qu'emploient ici Solomon et ses collègues, n'a toutefois rien à voir avec le marché de permis à polluer. Ni par ailleurs, précisent les auteurs, avec des « échanges ('tradings') [diplomatiques] entre nations ayant signé un protocole ou l'autre » (*i.e.* Montréal ou Kyoto). Par 'trading', les auteurs désignent « la substitution d'un gaz à un autre qui se trouve dans le même panier, avec une magnitude de substitution permise calculée à l'aide de l'ODP ou du GWP. » D'où notre traduction de « 'trading' » par « choix » – au sens de choix d'une formule de réductions de GES adoptée (*mais, donc, d'un choix toujours à l'intérieur d'un même panier*). [Daniel *et al.*, 2012, p. 242]

(« la plupart du temps ») *des entités aux temps de résidence atmosphérique semblables*. [Daniel *et al.*, 2012, pp. 242-245]

Or, cette stratégie de regroupement des ODS par « paniers », affirment les scientifiques de l'ozone que sont Solomon, Daniel et McFarland, *a été décisive dans le succès politique du Protocole de Montréal*. Les auteurs n'hésitent pas à affirmer que, si elle n'avait pas été adoptée, « le succès du Protocole de Montréal sur le court terme aurait pu être mis en péril ». D'après eux, la Figure 49 ci-dessous le démontrerait au sujet des CFC et des HCFC. D'après leurs calculs, les auteurs de "Limitations of single-basket trading: lessons from the Montreal Protocol for climate Policy"sont parvenus à la conclusion suivante : si, à la fin des années 1980, les CFC et les HCFC avaient été règlementés ensemble, dans un même panier, en fonction de leurs ODP (statiques), un « pic » de libération de chlore se serait produit. En effet, les ODP des HCFC sont beaucoup plus faibles que ceux des CFC (voir notre Tableau 2 dans le Chapitre 8). *Mais*, leur durée de vie moyenne dans l'atmosphère est également plus faible – elle est, typiquement, de l'ordre de ~1-18 ans pour les HCFC (à l'exception de du HCFC-23, qui a une durée de vie de plus de 200 ans), contre ~45-640 ans pour les CFC [*WMO/…*, 2011, pp. 1.29 & 1.30]. Par conséquent, si, au moment des premières règlementations de Montréal à la fin des années 1980, on avait calculé le droit à polluer en fonction des ODP (statiques), on aurait imposé peu de "contraintes" sur les émissions de HCFC, c'est-à-dire permis de plus gros volumes d'émissions de HCFC. La libération de chlore aurait alors tendu vers la courbe en pointillé « 'only HFCF consumption' » de la Figure 49. En d'autres termes, à court terme, dans les années ~1990-2020, la couche d'ozone aurait été grandement mise en danger. [Daniel *et al.*, 2012, pp. 242-245][502]

[502] Solomon et ses collègues expliquent : certes, « une mutation complète, immédiate et mondiale des CFC vers les HCFC aurait mené à une diminution des impacts sur la couche d'ozone entre 2060 et 2100 de l'ordre de 15 à 25% plus importante que celle générée par les réglementations de Montréal » ; *toutefois*, *ce gain à long terme se serait fait aux dépens des bienfaits à plus court terme*. En effet, un pic de chlore se serait produit entre 1990 et 2030. Les auteurs estiment qu'il aurait été « presque 50% plus important » que le pic qui est effectivement observé au moment où ils écrivent (en 2012). « Ceci aurait fait augmenter le risque de formation d'un trou de l'ozone arctique, et d'une plus grande destruction d'ozone dans les latitudes moyennes », écrivent-ils. [Daniel *et al.*, 2012, pp. 242-245]

Précisons que les auteurs de "Limitations of single-basket trading: lessons from the Montreal Protocol for climate Policy" ont réalisé leurs calculs sur la base des ODP en 1989. Par ailleurs, ils rendent compte des impacts sur l'ozone des émissions de CFC et des HCFC par le biais de la métrique 'EESC' ('Equivalent Effective Stratospheric Chlorine'). Il s'agit d'une grandeur, dépendante du temps, qui représente la quantité de chlore (ou de brome, pour d'autres produits, mais par équivalence avec l'action du chlore) disponible dans la stratosphère pour détruire l'ozone. [Daniel *et al.*, 2012, pp. 242-245]

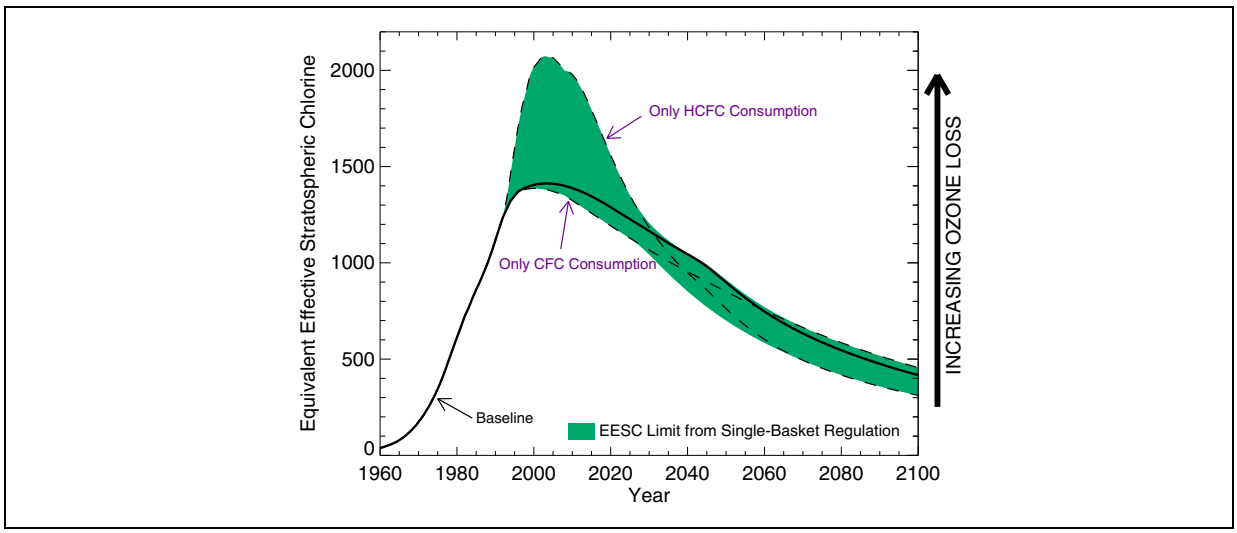


Figure 49 : Evolution des concentrations d'ozone stratosphérique au cours du temps, selon plusieurs méthodes de réglementation des ODS : en pointillé, les cas idéaux, hypothétiques, de permission des seules consommations de HCFC et de CFC (c'est-à-dire de gouvernances où CFC et HCFC sont réglementés ensemble, sur la base d'un calcul fait à l'aide de leurs ODP) ; en trait plein, la libération de chlore par les CFC et les HCFC, estimée d'après des mesures 'in situ' jusqu'aux années 2000, puis projetée au-delà à l'aide de simulations numériques
[Daniel *et al.*, 2012, « Fig. 1 », p. 245]

Peu nous importe ici la pertinence des calculs de Solomon et de ses collègues. Le point important tient dans le fait qu'ils utilisent leur courbe pour *démontrer la vertu de l'approche par paniers, dans lesquels des ODS aux durées de vie semblables sont regroupés*. Dans le cas de la mise en œuvre du Protocole de Montréal, expliquent-ils, la réglementation *conjointe* des CFC et des HCFC dès la fin des années 1980, *dans des paniers différents*, a permis d'éviter un pic de chlore, donc un pic de destruction de la couche d'ozone.

A présent que Solomon, Daniel et leurs collègues ont démontré les vertus de l'approche dite « à paniers multiples » pour la gouvernance de l'ozone (tout le moins pour les CFC et HCFC), ils vont montrer comment ils entendent la décliner pour servir les réductions de GES dans la gouvernance climatique. Qu'en est-il, en effet, de la méthode Kyoto ? « Les discussions sur les réglementations des GES se sont généralement focalisées sur des négociations à l'intérieur d'un même panier », déplorent Solomon et ses collègues. Les pays signataires doivent atteindre des objectifs globaux, généraux de réduction de leur potentiel de réchauffement. Ils peuvent pour cela choisir parmi les six GES dits « de Kyoto » – le dioxyde de carbone (CO_2), le méthane (CH_4), l'oxyde nitreux (N_2O), les hydrofluorocarbures (HFC), les hydrocarbures perfluorés (PFC) et l'hexafluorure de soufre (SF_6) –, dont le potentiel de réchauffement est rendu commensurable à l'aide de la métrique GWP_{100} – c'est-à-dire à un potentiel de réchauffement global ramené à un horizon de 100 ans.

Le premier biais d'une telle approche est intrinsèque au domaine politique. Comme le relèvent Solomon et ses collègues, « le Protocole de Kyoto a accordé plus de flexibilité aux émetteurs de GES [que le Protocole de Montréal n'en avait accordé aux émetteurs d'ODS], en leur permettant de choisir entre différents GES. » Pour le dire autrement, « la flexibilité de l'approche choisie pour le Protocole de Kyoto a tendance à générer un coût total des abattements de pollution moindre qu'une réglementation GES par GES » [Daniel *et al.*, 2012, pp. 247 & 243]… Avec des réglementations GES par GES, on aurait en effet très probablement pu accélérer le processus de réduction de chaque GES, donc au final de l'ensemble des GES. Des baisses d'émissions de méthane, d'oxyde nitreux, d'hydrofluorocarbures, de hydrocarbures perfluorés et d'hexafluorure de soufre (les cinq gaz de Kyoto autres que le CO_2) auraient en effet impacté des secteurs d'activité multiples. Elles se seraient additionnées, dans ces secteurs, à des réductions d'émissions de CO_2 qui, elles, impactent tous les secteurs d'activité… Le problème devenant, dès lors, l'accompagnement financier des secteurs d'activité touchés par la "double peine" (CO_2 + un autre gaz de Kyoto).[503]

Les auteurs n'insistent pas sur cet aspect "politique", sur lequel on attendrait plutôt des expertises d'économistes. En scientifiques du changement climatique, Solomon et ses collègues souhaitent apporter une expertise propre. La stratégie des paniers multiples, qu'ils proposent aux « décideurs politiques » d'adopter, doit pouvoir être scrupuleusement renseignée par leur science, et se justifier par leur science. Ces paniers doivent être, à terme, définis à l'aide de quantificateurs, de « métriques » dignes de leur savoirs scientifiques, qui prennent mieux en compte les temporalités multiples de la science du changement climatique. Leurs propositions de réductions différenciées par paniers doivent délimiter des chemins possibles, « des limites précises » à ne pas dépasser pour chaque groupe de GES, à l'image de ce qu'avaient accompli les paniers de Montréal, qui « avaient établi des limites précises de comment l'ozone pouvait se rétablir ». La composition des paniers doit être

[503] Le fait que les scientifiques dissertant sur les limites du Protocole de Kyoto soient états-uniens pour la plupart peut surprendre à première vue. Les Etats-Unis n'ont pas signé le protocole, et n'envisagent nullement de le faire au moment où lesdits scientifiques écrivent leurs articles. Suite à l'échec des négociations de la COP de Copenhague en décembre 2009, qui ont été inaptes à générer un accord international sur le changement climatique digne de ce nom (c'est-à-dire avec des objectifs précis de réductions des émissions de GES), tous les regards, et en particulier en Amérique du nord (rappelons que le Canada s'est retiré du Protocole de Kyoto en décembre 2011), sont à présent tournés vers Paris 2015 (COP21), où un accord international contraignant pourrait enfin être signé par les Etats-Unis (mais dont il reste à préciser la substance). Il faut donc voir la comparaison des Protocoles de Montréal et Kyoto que font Solomon, Daniel et leurs collègues états-uniens comme une méthode heuristique pour réfléchir à des mesures climatiques *hors Protocole de Kyoto* dans l'avenir, et non comme une méthode corrective du Protocole de Kyoto. Les auteurs n'entendent pas se muer en négociateurs, ni en juristes. Pas plus qu'ils ne souhaitent se confronter à des considérations d'économistes – ils précisent d'emblée qu'ils « ne prendront pas en considération les contraintes technologiques et économiques ». [Solomon *et al.*, 2013, pp. 428-434]

définie par la bonne science, par les bonnes métriques appliquées aux bons gaz (voire aux bons aérosols). [Solomon *et al.*, 2013, pp. 433-434]

Choisir une métrique – ou des métriques conjointes – correspond à « un jugement de valeur », écrivent fort à propos Solomon et ses collègues. Ils montrent que le GWP est moins apte à corréler les émissions à des changements de température que le GTP ('Global Temperature Potential' : à un instant donné, changement de température qui résulte d'une unité d'émission de GES, par rapport à la même émission de CO_2), mais qu'il « représente mieux la montée du niveau des mers (d'après Smith & Wigley, 2000) ». Mais, soulignent-ils, c'est surtout « le choix d'un horizon temporel particulier qui inclut des jugements de valeur au sujet de l'importance des changements climatiques à différents moments. » [Solomon *et al.*, 2013, pp. 433-434]

« De nombreuses études ont examiné les manières de traiter efficacement le réchauffement à court terme ou à long terme ». Pourtant, déplorent Solomon et ses coreligionnaires, « la majorité des discussions politiques ont tourné autour de métriques de GES qui sont incapables de donner le chemin vers des objectifs politiques différenciés au cours du temps. » Les auteurs vont donc chercher à démontrer que les temporalités d'action des GES et des aérosols sur le climat sont au moins aussi importantes, voire plus importantes pour guider l'action politique sur les GES, que dans le cas des ODS, où cette stratégie a été payante, d'après eux [Solomon *et al.*, 2013, pp. 433-434]. Ils expliquent :

> « L'horizon temporel » auquel ont été rapportés tous les GWP du Protocole de Kyoto est « 100 ans ». « Les gaz atmosphériques avec des temps de vie courts de quelques années ou décennies ont un GWP beaucoup plus important dans un horizon temporel de quelques années ou décennies que ne l'est leur GWP à des horizons temporels de 100 ans ou plus. Le choix de l'horizon temporel représente donc des jugements de valeur implicites au sujet de l'importance des impacts climatiques à court ou à long terme, qui est soit tue, soit méconnue pour certains gaz. Le choix d'un ODP en régime stationnaire comprenait également des jugements de valeur implicites, mais ils furent moins importants qu'ils n'auraient pu l'être, du fait de l'utilisation, sous le Protocole de Montréal, d'un schème à paniers multiples, qui regroupaient la plupart du temps les gaz à durée de vie semblable. [...]
>
> « La compréhension [des effets radiatifs comparés des différents gaz à effet de serre] s'est améliorée [pendant le temps] qui s'est écoulé depuis la signature du Protocole de Kyoto. Il est à présent attesté qu'aucune métrique unique ne peut quantifier avec exactitude les impacts climatiques des gaz de Kyoto sur l'ensemble des échelles de temps, en prenant simplement en compte les différences de leur temps de vie. De plus, il a été montré que définir, même avec précision, une limite pour des émissions totales pesées à l'aide du GWP

> ne permet pas d'établir une prévision unique du forçage climatique, ni une prévision unique des chemins de température. Du fait de ces limitations, il a été suggéré qu'il était nécessaire d'évoluer vers des restrictions gaz par gaz, ou tout le moins vers des paniers multiples qui regrouperaient des substances en fonction de leur temps de résidence dans l'atmosphère. » [Daniel *et al.*, 2012, pp. 242-244]

Il ne resterait plus qu'à concilier l'action politique aux nouveaux savoirs scientifiques élaborés depuis une dizaine d'années !

Les deux paniers de Susan Solomon et ses collègues

Quelle pourrait être la composition des paniers de GES, et quelles métriques seraient pertinentes pour l'établir ? Dans leur article de 2013, Solomon, Daniel et leurs collègues comparent quatre métriques, deux à deux. Ils mettent d'abord en regard le *forçage radiatif* et les *concentrations en équivalent-CO_2*. Puis, ils consacrent une longue étude comparée du *GWP* et du *GTP*. A ce stade précoce de discussion sur les paniers de GES, les cinq scientifiques restent toutefois prudents, et proposent de commencer par distinguer entre deux groupes de GES seulement. Car, insistent-ils, nous avons besoin « au minimum » d'une approche à deux paniers. [Solomon *et al.*, 2013, p. 434]

Le premier panier regrouperait des agents de forçage radiatif à durée de vie beaucoup plus faible que le CO_2, « tels que le méthane, l'ozone troposphérique et le carbone suie ». Pour ces gaz et aérosols à faible temps de résidence atmosphérique, la métrique GWP_{100} seule n'est pas suffisante. Les auteurs proposent d'utiliser un GWP alternatif, un GWP_h qui se décline pour plusieurs horizons temporels *h*. Au lieu d'utiliser uniquement un GWP_{100} à horizon 100 ans, il faut, par exemple, calculer également les impacts à horizon 25 ans, à l'aide d'un GWP_{25} (forçage radiatif sur 25 ans, par rapport à l'action d'une même quantité de CO_2), et les impacts à horizon 50 ans, à l'aide d'un GWP_{50}. Ces métriques donneront en effet un ordre de priorité et une magnitude de réduction d'émissions des agents de forçage radiatif différents du GWP_{100}, l'unique métrique qu'avait consacrée le Protocole de Kyoto. Plus haut dans le texte, les auteurs avaient expliqué :

> « Pour des gaz à faible durée de vie (par exemple, le méthane), le changement de concentration atmosphérique du gaz qui suit son émission est énorme. Il en résulte que la valeur du GWP dépend fortement de l'échelle de temps choisie. En 2007, Forster et ses collègues ont publié leurs valeurs de GWP_h obtenus pour différents gaz, avec h = 20, 100 et 500 ans. Le méthane, par exemple, possède un GWP à horizon 100 ans (GWP_{100}) égal à 25, mais un GWP_{500} de 7,6 seulement. » [Solomon *et al.*, 2013, pp. 423-424]

Pour d'autres gaz, il sera pertinent d'estimer leurs forçages radiatifs à plus court terme (h=20, 25, 50 ans). « La plupart des problèmes avec le GWP et le GTP ne sont pas intrinsèques aux métriques elles-mêmes, renchérissent les auteurs, mais à l'imposition d'une

unique échelle de temps pour calculer la métrique » [Solomon *et al.*, 2013, p. 434]. Il existe en effet une mosaïque d'impacts à diverses échelles temporelles, que divers auteurs sont parvenus à corréler de manière quantitative à l'augmentation des concentrations atmosphériques de gaz et d'aérosols à courte et moyenne durée de vie.

Les incertitudes sur ces savoirs restent immenses. C'est même pour cela que Solomon et ses collègues s'en tiennent, à ce stade, à deux paniers. En tout cas, afin de surmonter le défi scientifique, la chimie atmosphérique aura à l'avenir un rôle important à jouer, afin d'expliquer la formation de l'ozone troposphérique et les autres processus de création/destruction de GES, pour rendre compte de la complexité chimique des aérosols et donc de leur impact radiatif, *etc.* Car, comme nous l'avons expliqué plus haut, l'ozone troposphérique, polluant secondaire, est un GES puissant. Ensuite, les forçages indirects des aérosols présents dans les nuages pourraient également jouer un rôle radiatif important (même si les courts temps de vie et les grandes variations géographiques des aérosols et de l'ozone troposphérique rendent l'estimation de leurs forçages radiatifs très incertains). Autre exemple, les aérosols soufrés auraient un impact climatique très important. Dernier exemple, qui rappelle quant à lui que certains réchauffements régionaux sont à prendre en considération tout autant que le réchauffement moyen global : les augmentations de carbone suie (et d'ozone troposphérique) ont peut-être contribué aux forts taux de réchauffement observés en Arctique par rapport au reste du globe… même s'il faut, bien sûr, insister sur le fait que la montée des eaux devrait en définitive dépendre principalement des processus de réchauffement sur le long terme, donc des émissions de CO_2. [Solomon *et al.*, 2013, pp. 417-420 & 434]

« Raboter le pic » de réchauffement

Venons-en au point crucial : l'objectif environnemental principal de la réglementation des polluants du premier panier. Il ne s'agit pas, dans l'idéal, de simplement "gagner du temps", de gagner plusieurs décennies dans l'attente qu'une voie soit trouvée vers une économie décarbonée, expliquent les auteurs de l'article "Atmospheric Composition, Irreversible Climate Change, and Mitigation Policy" (2013). Mais, de « *Tailler / raboter le pic ('trimming the peak') » de réchauffement à court terme afin de ne pas excéder le seuil critique de* « +2°C ». Depuis le milieu des années 1990, les négociateurs se donnent en effet « +2°C » comme limite de réchauffement à ne pas dépasser – bien que les auteurs de l'AR5 insistent sur le fait que des seuils plus bas ont été proposés (+1,5°C ou des concentrations-seuils de 350 ppm de CO2-

équivalent moyen).[504] [Aykut & Dahan, 2011, pp. 149-151 ; *IPCC (WG I)*, 2014, pp. 70-72]. La Figure 50 ci-dessous, que proposent Solomon et ses collègues, en apporterait la démonstration.

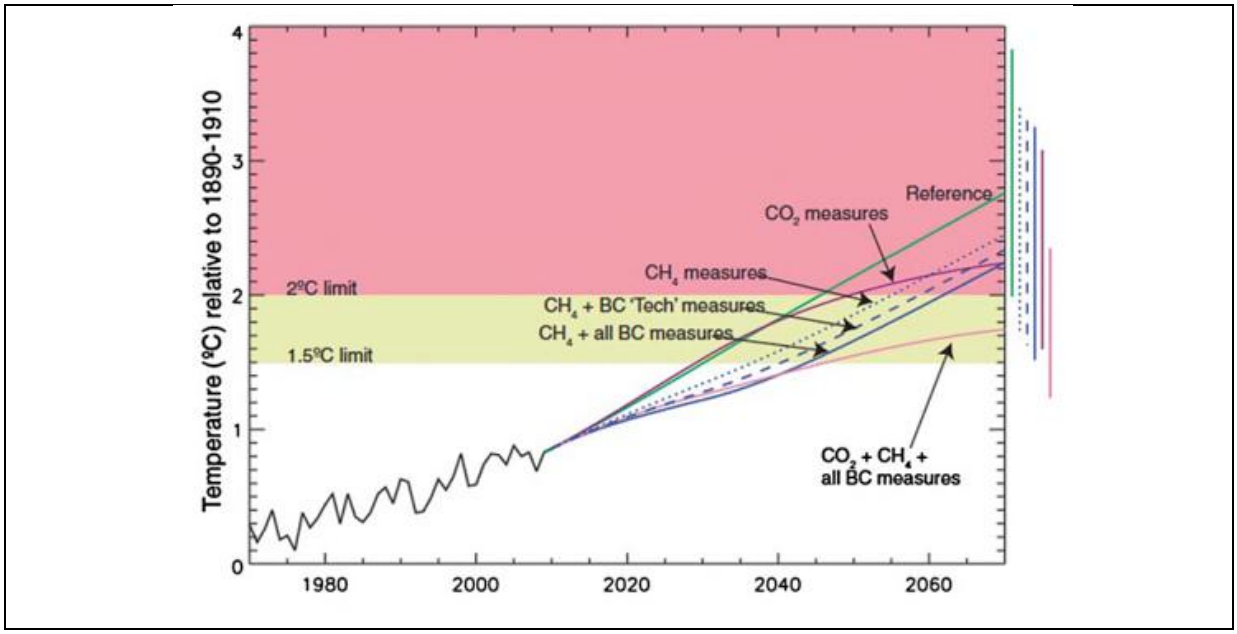


Figure 50 : « Déviation de température observée jusqu'en 2009, et projections d'après plusieurs scénarios »
(BC désigne le 'Black Carbon', carbone suie en français)
[Solomon *et al.*, 2013, p. 432]

« Prendre en compte le réchauffement provisoire dû aux GES de courte durée de vie », et par conséquent réduire les émissions des gaz et aérosols de courte durée de vie, du carbone suie en particulier, constitue donc « une manière hautement efficace de réduire le forçage climatique sur les plus courtes temporalités », concluent les auteurs. De plus, précisent-ils, « les retards dans la limitation des agents de forçage de courtes durées de vie impliqueront une séquestration de chaleur plus grande dans l'océan profond ; ainsi, l'utilité de raboter le pic sera grandement tributaire du moment où les limitations seront mises en œuvre. Le plus tôt les émissions seront réduites, les plus grands seront les bénéfices du rabotage du pic (voir Held *et al.*, 2010, "Probing the Fast and Slow Components of Global Warming by Returning Abruptly to Preindustrial Forcing"). » [Solomon *et al.*, 2013, pp. 432-434]

Toutefois, si prendre en considération exclusivement le CO_2 revient à privilégier le long terme aux dépens du moyen terme, il n'en faut pas moins accentuer les efforts sur les

[504] Les auteurs de l'AR5 précisent en outre que les études récentes indiquent que le seuil de fonte menant à la disparition presque complète de la calotte glaciaire du Groenland pendant un millénaire ou plus, et élèverait le niveau moyen des mers de 7 mètres environ, se situerait certes au-dessus de 2°C, mais au-dessous de 4°C. [*IPCC (WG I)*, 2014, pp. 70-72].

réductions de CO_2, et ceci de manière concomitante aux éventuelles réductions d'émissions du premier panier. Car, ces dernières « « n'achètent pas du temps » pour les réductions de carbone et des autres gaz à longue durée de vie », martèlent Solomon et ses collègues. « Le jugement de valeur » qui consisterait à donner le primat aux GES de courte durée de vie, insistent-ils, serait même plus néfaste encore que celui qui négligerait les réductions de ces gaz. [Solomon *et al.*, 2013, pp. 432-434]

Comme le montre la Figure 51 ci-dessous, « la masse de bénéfices supposés des mesures de réduction de CH_4 et de carbone suie sera réalisée dès 2040 ; le réchauffement à plus long terme, qui fera suite, sera de plus en plus dépendant des émissions de CO_2 ». « Raboter le pic ne peut pas se substituer à des réductions d'émissions de dioxyde de carbone. Si elles ne sont pas réduites, les concentrations de CO_2 vont dominer le climat de la Terre pendant de nombreux siècles ». D'où la nécessité de définir des réglementations pour les gaz à longue durée de vie, qui constitueront *un second panier*, avec une insistance particulière sur un élément particulier du panier, le CO_2.

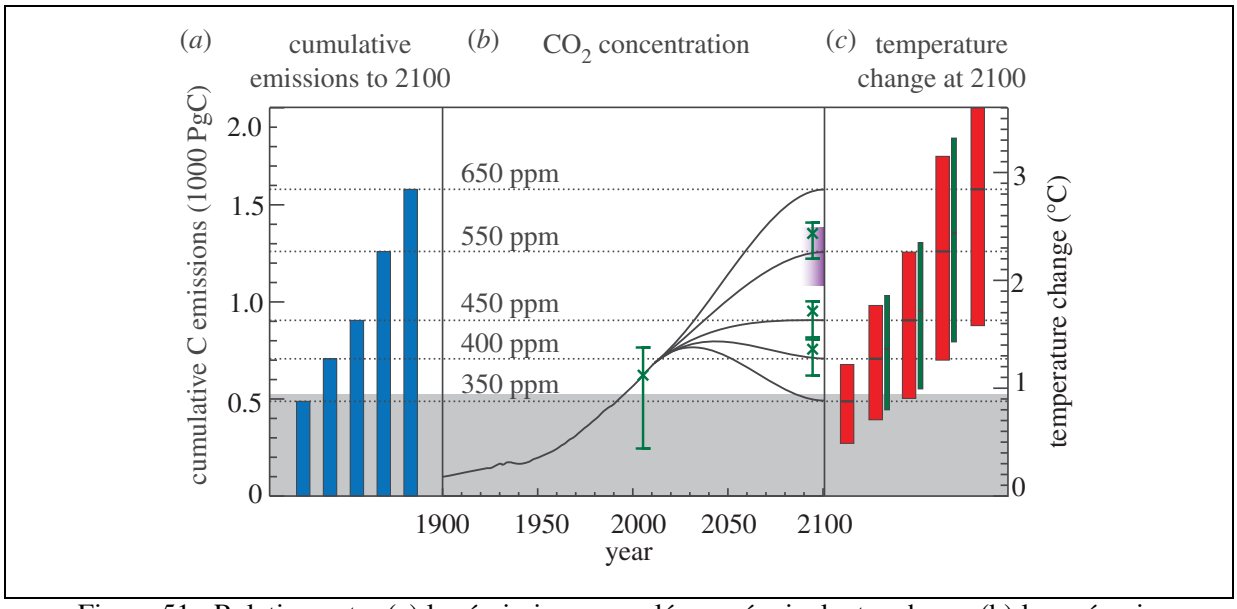


Figure 51 : Relation entre (a) les émissions cumulées en équivalent carbone, (b) les scénarios d'émissions de CO_2 et (c) l'élévation de la température globale à l'horizon 2100 (d'après le modèle numérique UVic ESCM)
[Matthews *et al.*, 2012, « Figure 6 », p. 432]

Sans surprise, Solomon et ses collègues ne s'attardent pas, en effet, sur les produits chimiques perfluorés (CF_4, NF_3, $C2F_6$, *etc.* ; durée de vie atmosphérique entre 500 et 50000 ans selon le gaz considéré), ni sur le N_2O (120 ans environ), ni sur les chlorofluorocarbures ($CFCl_3$, CF_2Cl_2, *etc.* ; 50 à 1000 ans selon le gaz considéré), mais sur le gaz à effet de serre à

longue durée de vie de loin le plus massivement émis : le CO_2.[505] En ce qui concerne le CO_2, jugent-ils, l'horizon h = 100 ans choisi par Kyoto est trop faible, et le GWP n'est pas la meilleure métrique. Les auteurs proposent d'en privilégier une autre : *les émissions cumulées de carbone*. En 2009, H. Damon Matthews avait co-signé un article dans *Nature* intitulé "The proportionality of global warming to cumulative carbon emissions", avant de récidiver trois ans plus tard avec Solomon et Pierrehumbert dans les *Philosophical Transactions of the Royal Society*, avec un article que nous avons déjà cité plus haut (Matthews *et al.*, 2012, "Cumulative carbon as a policy framework for achieving climate stabilization"). Matthews, Solomon et Pierrehumbert y expliquaient qu'il fallait privilégier cette métrique pour guider les politiques de réduction du CO_2, parce que « les recherches récentes [avaient] montré que le changement de température [moyenne, globale et annuelle de l'atmosphère de surface] pouvait être décrit efficacement comme une fonction du budget cumulé d'émissions carbonées » – même si les auteurs admettaient que d'importances incertitudes demeuraient, liées aux « réponses du cycle du carbone » et aux forçages radiatifs autres que le CO_2 (aux aérosols, en particulier)[506]. Et de proposer « par conséquent que les émissions de carbone cumulées deviennent le cadrage alternatif appliqué, à la fois comme outil de mitigation climatique [(cadrage alternatif à l'approche de Kyoto par la métrique GWP_{100})], et comme moyen d'estimation des impacts potentiels [du CO_2] sur le climat. » [Matthews *et al.*, 2012, pp. 4365 & 4375]

Au cours des négociations climatiques, des PVD défendent traditionnellement la métrique « émissions cumulées », arguant que les pays industrialisés ont contracté une dette en CO_2 au cours du XX^{ème} siècle. Solomon et ses collègues mettent en avant un argument tout autre. L'intérêt majeur que présente le calcul de réduction de CO_2 sur la base des calculs d'émissions cumulées, écrivent-ils, est d'éviter ce que les auteurs appellent l'« irréversibilité du changement climatique », c'est-à-dire le franchissement de « points critiques ('tipping points') » vers un climat global totalement différent de celui qui a vu l'humanité s'épanouir jusqu'à présent, et sans espoir de retour à l'état antérieur. Dans l'article de 2013, Solomon et ses collègues écrivent :

> « Dans la littérature récente, le concept d'irréversibilité du changement climatique dû aux émissions de CO_2 a d'abord été souligné par Matthews et Caldeira (2008, "Stabilizing climate requires near-zero emissions"), sur la base de leurs résultats obtenus avec un Earth Model of

[505] Solomon et ses collègues précisent simplement, dans l'article de 2013, qu'« un travail complémentaire devra être réalisé afin de déterminer si les perfluorocarbures pourraient être inclus dans ce panier, par le biais d'un ajustement approprié de la métrique du carbone cumulé ». [Solomon *et al.*, 2013, p. 434]

[506] Matthews et ses collègues expliquent :

> « A la fois les concentrations atmosphériques de CO_2 pour une année donnée et le changement de température associé sont généralement associés à un budget d'émissions cumulées de carbone, qui est largement indépendant du scénario d'émissions choisi. En corollaire, le taux de changement de température globale peut être corrélé au premier ordre au taux d'augmentation d'émissions de carbone cumulées. » [Matthews *et al.*, 2012, p. 4365]

> Intermediate Complexity (EMIC). Ceci a conduit à reconnaître que le carbone cumulé (l'ensemble des tonnes de carbone émises) avait une utilité politique toute particulière. Matthews et Caldeira (2008) montrèrent que, si les émissions de CO_2 étaient éliminées, la température moyenne globale se stabiliserait et demeurerait approximativement constante pendant plusieurs centaines d'années ; remarquablement, bien que les concentrations de CO_2 diminueraient dans l'atmosphère, les températures demeureraient à un niveau constant, du fait d'un déclin du taux de capture de chaleur par les océans. D'autres études EMIC [dont Solomon *et al.* (2009)] ont démontré l'irréversibilité du réchauffement induit par le CO_2 [à un horizon de plusieurs millénaires], alors que des modèles plus complets arrivaient à des résultats semblables à un horizon de plusieurs siècles (à défaut de pouvoir calculer plus loin). [...]
>
> « Si, dans le futur, nous faisions l'expérience d'un « 'tipping point' » (Lenton et al., 2008) [en fait, les auteurs de cet article parlent de « 'tipping elements' »]) dans le système Terre, même la cessation immédiate des émissions de CO_2 ou des émissions des autres composés à longue durée de vie serait incapable d'abaisser substantiellement la température globale, même à des échelles de temps égales à des dizaines de générations. Le réchauffement persistant sur de nombreux siècles est particulièrement pertinent pour comprendre les impacts, y compris la grande élévation du niveau des mers, qui se produit dans un monde plus chaud du fait de l'expansion thermique des parties océaniques profondes et de la potentielle perte graduelle des grandes couches de glace du Groenland et de l'Antarctique. » [Solomon *et al.*, 2013, p. 434]

Si restreindre les émissions du premier panier pourra « raboter le pic » pour demeure sous les « +2°C », afin d'éviter par exemple des évènements climatiques extrêmes et « une augmentation rapide des superficies brûlées par des feux de forêts dans une décennie ou deux », diminuer drastiquement les émissions du second panier est nécessaire pour éviter un plus grand péril encore : *atteindre un seuil critique où le changement climatique deviendrait* éminemment dangereux, et même : « *irréversible* » (par exemple, avec la lente exfoliation des glaces au Groenland et en Antarctique sur plusieurs millénaires, et la subséquente montée massive du niveau des mers). [Solomon *et al.*, 2013, pp. 432-434]

Pour conclure, Solomon et ses collègues expliquent qu'il n'existe pas de métrique parfaite pour estimer précisément l'impact des différents GES à différents horizons temporels. Néanmoins, les savoirs actuels indiquent que les réductions portant sur les GES de faible durée de vie doivent être accélérées. Cette double assertion fournit à la fois un argument politique nouveau, et justifie un programme de recherche sur les GES à court terme "utile

pour les décideurs politiques" (qui impliquera notamment les chimistes de l'atmosphère). En effet, ils déclarent :

> « Il est à présent attesté qu'aucune métrique unique ne peut quantifier avec exactitude les impacts climatiques des gaz de Kyoto sur l'ensemble des échelles de temps, en prenant simplement en compte les différences de leur temps de vie. De plus, il a été montré que définir, même avec précision, une limite pour des émissions totales pesées à l'aide du GWP ne permet pas d'établir une prévision unique du forçage climatique, ni une prévision unique des chemins de température. Du fait de ces limitations, il a été suggéré qu'il était nécessaire d'évoluer vers des restrictions gaz par gaz, ou tout le moins vers des paniers multiples qui regrouperaient des substances en fonction de leur temps de résidence dans l'atmosphère. » [Daniel *et al.*, 2012, pp. 242-244]

Mais aussi :

> « Plusieurs métriques ont été proposées pour comparer les impacts climatiques dus aux augmentations de différents polluants atmosphériques d'origine anthropique (CO_2, CH_4, N_2O, SF_6, CFC, HFC, aérosols absorbants ou réfléchissants, précurseurs chimiques). L'objectif de telles métriques est de réduire un ensemble complexe d'influences à quelques nombres qui peuvent être utilisés dans le processus de réflexion autour de différents choix d'émissions qui affecteront le climat dans l'avenir. Entre autres utilités, les métriques ont été utilisées pour simplifier la formulation des actions politiques relatives au climat, des traités de protection du climat et des schèmes de négociations entre émissions ('emissions trading schemes'). Nous suggérons que, dans la mesure du possible, une métrique (ou un ensemble de métriques) ne devrait pas imposer des jugements de valeur, et moins encore des jugements de valeurs dissimulés ('hidden value judgments') (voir Fuglestvedt *et al.*, 2003, "Metrics of climate change: assessing radiative forcing and emission indices"). Les métriques devraient fournir un ensemble d'outils simplifiés mais clairs, que les décideurs politiques pourraient utiliser pour formuler des politiques en accord avec un ensemble de finalités de protection du climat que l'on s'est fixé. » [Solomon *et al.*, 2013, pp. 420-421]

Les scientifiques-experts mettent en avant leur neutralité. Si aucune métrique ne peut être « neutre », c'est-à-dire si *aucune ne peut ne pas* « imposer de jugements de valeur » (« toutes les métriques disponibles simplifient ou négligent des aspects temporels inhérents aux gaz particuliers (bien que de manière différente), et incorporent donc des choix et des jugements plutôt qu'ils ne représentent une métrique de science physique « pure » », écrivent-ils), au moins faut-il que ces jugements de valeur soient rendus « explicites ». Selon les auteurs, l'éventail de métriques qu'ils proposent contribue à tendre vers cet objectif. En outre, la science du changement climatique pourra définir, avec une pertinence croissante, le contenu de paniers de GES auxquels appliquer des politiques de réductions différenciées. [Solomon *et al.*, 2013, p. 422]

9.2. La réduction des émissions soufrées : un « dilemme politique » ?

La multi-temporalité d'action des GES (et des aérosols) a conduit S. Solomon et ses collègues à élaborer des métriques nouvelles, et à appeler à des politiques multi-panier. Parmi les réductions de GES de faible durée de vie, certaines offrent des *co-bénéfices* ; ainsi, une réduction d'ozone troposphérique sera bénéfique, à la fois pour la qualité de l'air et pour le climat. Réciproquement, des problèmes de *contradiction*, de *dilemme* entre politiques des pollutions atmosphériques émergent, en particulier autour des émissions soufrées.[507]

La métaphore du « pacte faustien » chez James Hansen

Repartons de l'article "Atmospheric Composition, Irreversible Climate Change, and Mitigation Policy" de 2013. Ses auteurs écrivent :

> « Dans la mesure où les aérosols à courte durée de vie [, qui sont pourtant pour certains des polluants d'origine anthropique,] produisent [en moyenne] un refroidissement, le fait qu'ils masquent [en partie] l'impact de la lourde charge d'agents de réchauffement implique qu'une invisible concession à long terme a déjà été faite à un plus grand réchauffement futur. » [Solomon *et al.*, 2013, p. 425]

Comprendre : dans l'idéal, nous devrions limiter nos émissions d'aérosols, dont certains sont des polluants délétères, en particulier dans les villes ; *mais*, si nous réduisons ces émissions, nous nous privons d'agents qui refroidissent l'atmosphère. Une fois ce « masque » d'aérosols retiré, le réchauffement climatique n'en sera que plus important, et donc les efforts de réduction des GES auxquels il faudra consentir deviendront plus importants. Solomon et ses collègues poursuivent :

> « [James] Hansen décrit cela comme un « pacte faustien ('Faustian bargain') ». Il veut dire par là que les augmentations anthropiques des masquages d'aérosols à courte durée de vie représentent implicitement une manière de permettre une plus ample accumulation de dioxyde de carbone et autres gaz à effet de serre à longue durée de vie dans l'atmosphère,

---

[507] Les premières théories des dilemmes /co-bénéfices entre politiques des pollutions atmosphériques furent développées par des *chimistes et des ingénieurs des pollutions troposphériques régionales* (semble-t-il dans les années 1990). Dans son ouvrage *Pollution atmosphérique. Des processus à la modélisation*, paru en 2008, Bruno Sportisse (CEREA, Centre d'Enseignement et de Recherche en Environnement Atmosphérique, laboratoire commun à EDF R&D et à l'Ecole Nationale des Ponts et Chaussées) parle ainsi de « co-bénéfices » et de « dilemmes atmosphériques ». Outre les dilemmes entre qualité de l'air et changement climatique posé par les aérosols soufrés, B. Sportisse met en garde contre le dilemme posé par les biocarburants (qui émettent moins de NO_x mais plus de particules (PM) et de COV), et contre le dilemme posé par de nouvelles motorisations automobiles (dont les émissions ont une teneur plus faible en soufre et en gros aérosols, mais qui génèrent plus de particules fines, très toxiques). [Sportisse, 2008, pp. 92, 196 & 262]

Dans cette thèse, nous nous sommes focalisés sur des co-bénéfices / dilemmes possédant une dimension globale (soit des co-bénéfices / dilemmes entre qualité de l'air et changement climatique, soit des co-bénéfices / dilemmes entre la couche d'ozone et au changement climatique).

qui sera au bout du compte plus dangereuse (voir par exemple Hansen & Lacis, 1990). » [Solomon *et al.*, 2013, p. 425]

Dans un article de 1990 publié dans *Nature*, deux chercheurs de la NASA ('Goddard Institute for Space Studies'), Andrew Lacis et le déjà médiatique climatologue James Hansen (1941-…)[508] ont en effet introduit dans la littérature sur le changement climatique la métaphore goethéenne du pacte de Faust avec Méphistophélès. Après avoir démenti que la variabilité solaire puisse expliquer les tendances de température atmosphérique globale observées, et après avoir souligné l'importance potentielle des éruptions volcaniques, Lacis et Hansen se focalisent sur le rôle des aérosols troposphériques. Ils écrivent :

> La combustion fossile n'est pas seulement responsable d'émissions de CO_2, elle « libère également du SO_2, qui contribue à la formation d'aérosols atmosphériques qui contrent en partie le réchauffement par effet de serre, en réfléchissant la lumière du Soleil et en augmentant la couverture nuageuse. La durée de vie du CO_2 additionnel est de l'ordre de 10^2 ans (même si son cycle biosphérique est plus court), alors que le temps de vie des aérosols soufrés est de quelques jours seulement. Cette différence de durée de vie a des implications importantes pour l'efficacité de nos changements d'usage des carburants fossiles.
>
> « Imaginons pour commencer un cas extrême, dit Cas I, où nous supposons que les aérosols troposphériques générés par les combustibles fossiles ont annulé une large fraction de l'effet de serre anthropique, disons la moitié environ, ce qui est approximativement la quantité d'effet de serre dû au CO_2. Ce cas est concevable [...] Le réchauffement induit par le CO_2 serait alors éliminé seulement par une augmentation exponentielle de l'utilisation des carburants fossiles [, qui génère des aérosols soufrés]. Mais ce serait un pacte faustien, car les carburants fossiles finiraient par s'épuiser, à la suite de quoi l'énorme réchauffement induit par le CO_2 débuterait.
>
> « Comme Cas II, nous supposons que le refroidissement des aérosols est négligeable comparé au réchauffement induit par le CO_2. Dans ce cas, toute réduction dans l'utilisation des carburants fossiles réduit de manière directe le réchauffement induit par le CO_2. Le monde réel se situe de manière quasi certaine quelque part dans le continuum entre les Cas I et II, mais nous ne savons pas où. » [Hansen & Lacis, 1990, p. 718]

« Ainsi, déplorent les auteurs, jusqu'à ce que la recherche sur les aérosols soit effectuée (une tâche difficile), nous ne savons même pas dans quelle direction ira le changement de forçage climatique par modification de l'utilisation de combustibles fossiles dans les

[508] Comme de nombreux chercheurs de la NASA dans les années 1970, James Hansen avait débuté ses travaux sur le changement climatique dans une perspective de planétologie comparée (travaux sur les transferts radiatifs de Vénus, notamment), avant de devenir, à la fin des années 1980, l'un des scientifiques du changement climatique les plus alarmistes et les plus médiatiques (aussi, ses déclarations et articles susciteront-ils à maintes reprises l'ire des moins alarmistes). En 1990, au moment où il co-signe son article avec A. Lacis, J. Hansen a déjà été sollicité à plusieurs reprises par le Congrès des Etats-Unis pour donner son expertise sur les risques inhérentes aux émissions de GES. [Oreskes & Conway, 2010, pp. 183-198]

prochaines décennies ». Hansen et Lacis n'appellent toutefois pas à un 'statu quo', qui serait observé jusqu'au moment où les émissions d'aérosols soufrés auraient baissé. Ils « conseillent aux décideurs politiques […] de supprimer progressivement les CFC, d'améliorer l'efficacité énergétique, d'augmenter le recyclage, de réduire la déforestation et de planter des arbres dans des lieux appropriés », car cela est nécessaire « pour d'autres raisons » que le changement climatique, et sera bénéfique au climat dans le long terme ; et, ils recommandent par ailleurs de mener des politiques pour « stabiliser » la population globale. [Hansen & Lacis, 1990, p. 718]

La métaphore du « pacte / dilemme faustien » réapparaît à la fin des années 2000, sous l'impulsion de James Hansen lui-même, notamment dans *Storms of My Grandchildren: The Truth About the Coming Climate Catastrophe and Our Last Chance to Save Humanity* (2009), ouvrage dont le sixième chapitre a pour titre "The Faustian Bargain: Humanity's Own Trap" [Hansen, 2009]. Il ne s'agit plus, à présent, de parler d'indécision, mais de « piège » qui se referme. Le masque d'aérosols est devenu le masque d'une tragédie dont le titre se précise.

Toutefois, l'ennemi de la lutte contre le changement climatique a-t-il changé ? En 1990, Hansen et Lacis faisaient remarquer que, alors qu'il semblait très improbable, au vu des tendances passées, qu'une « diminution de l'activité solaire dans l'avenir puisse annuler le réchauffement par effet de serre », « cette vision [avait] été adoptée dans un rapport rendu récemment au chef d'Etat-major du président [George H.W.] Bush, qui sout[enait] que l'on d[evait] s'attendre à un déclin de l'irradiance solaire précocement dans le vingt-et-une siècle. Les auteurs s'oppos[aient] ensuite à des mesures pour ralentir l'accroissement du forçage dû aux gaz à effet de serre, parce que de tels efforts « pourraient s'avérer inutiles et même dangereux si quelque substantiel refroidissement naturel advenait au vingt-et-unième siècle » (Seitz, Jastrow & Nierenberg, 1989, *Scientific Perspectives on the Greenhouse Problem*, Marshall Institute, Washington D.C.). »[509] [Hansen, 1990, p. 715]

[509] Ni Seitz, ni Jastrow, ni Nierenberg ne sont des spécialistes de la science du changement climatique. Ils font partie des acteurs que Naomi Oreskes et Erik Conway ont nommé « marchands de doutes » (avec Fred Singer, Seitz, Jastrow et Nierenberg sont les « marchands de doutes » sur le changement climatique qui reviennent le plus souvent dans le livre de la sociologue et de l'historien des sciences). Ces « marchands de doute » utilisent une renommée acquise dans la recherche publique, pour décrédibiliser des alertes scientifiques sur des questions environnementales et/ou sanitaires (pluies acides, la destruction anthropique de l'ozone, tabagisme passif, changement climatique), qui ne relèvent pourtant pas de leur champ de compétence disciplinaire. Ils appartiennent souvent à des 'think tanks' privés, conservateurs et/ou néolibéraux (par exemple, Seitz a créé en 1984 le 'think tank' conservateur 'Marshall Institute') [Oreskes & Conway, 2010]. En Amérique du nord (car c'est également le cas au Canada), l'influence de ces détracteurs de l'urgence climatique (donc des conclusions du GIEC), souvent financés et relayés par les grands groupes pétroliers, ont manifestement contribué aux atermoiements des Etats-Unis (et du Canada) à prendre des engagements forts en faveur de la lutte contre les GES. On retrouve, par ailleurs, des formes de « climatoscepticisme » populaire à l'extérieur des Etats-Unis. Le philosophe et historien australien Clive Hamilton a fait remarquer qu'il s'était surtout « répandu, par le biais d'efforts coordonnés, vers les autres pays anglophones qui présentent des similarités [avec les Etats-Unis] en matière de cultures politiques, notamment en Australie, en

Les historiens Eric Conway et Naomi Oreskes ont confirmé ce parti pris "sceptique et/ou attentiste" de George Bush, en particulier au début de sa présidence, et comment l'histoire bégaiera avec ses successeurs [Conway, 2008, pp. 238-239 ; Oreskes & Conway, 2010]. Et, en particulier, sous la présidence de Bush fils. En 2009, Hansen peut ainsi rapporter une nouvelle anecdote de ce théâtre très nord-américain, qui emprunte parfois des tours que ne renierait pas la *commedia dell'arte* :

> « Le second graphique de Lindzen[510] [, présenté en 2001 et s'opposant aux conclusions récentes du rapport de l'Académie des Sciences,] montrait qu'il existait une corrélation élevée entre les taches solaires et le nombre de Républicains au Sénat. [Lindzen] conclut que l'analyse du GIEC était à peine meilleure que l'analyse taches solaires-Républicains, et même : « dans une certaine mesure, l'analyse climatique est encore plus douteuse, car les effets sont tellement plus faibles. »
>
> « La légèreté de la présentation de Lindzen ne doit pas nous empêcher de prendre conscience que ses présentations furent par ailleurs prises au sérieux par l'administration. Il y a de bonnes raisons de croire que [George W.] Bush, [Dick] Cheney [(vice-président des Etats-Unis)] et [Karl] Rove [(secrétaire général adjoint de la Maison Blanche)] partageaient tous la vision de Lindzen et se méfiaient de la communauté scientifique. [...] Le Prédisent ne demanda plus aucun conseil sur le réchauffement climatique à l'académie au cours de ses huit années de pouvoir qui suivirent. » [Hansen, 2009, p. 58]

L'ennemi aurait finalement simplement changé de prénom…

Toutefois, Hansen reconnaît à l'administration Bush fils un mérite : « avoir répondu aux recommandations de Hansen [(et/ou de Dina Kruger de l'*EPA* et/ou encore de Mark Jacobson de l'Université de Stanford] de réduire les émissions autres que le dioxyde de carbone, dont le méthane et le carbone suie ». Bien sûr, le pacte contracté avec le diable tient toujours, si l'on se focalise sur ces seules émissions à courte durée de vie – la « dette faustienne » subsiste [Hansen *et al.*, 2013, p. 7]… Mais, Hansen n'en salue pas moins sincèrement cet effort. Il ajoute même :

> « L'une des actions résultantes fut un programme de marché du méthane qui aida à réduire les émissions du méthane via sa capture dans les mines de charbon, des centres d'enfouissement, et des équipements de gestion de l'agriculture et des déchets, ainsi que la méthanisation, qui

Grande-Bretagne et dans les régions anglophones du Canada » [Hamilton, 2013, p. 129]. La situation de l'Europe continentale est différente, les "climato-sceptiques", comme ils sont parfois nommés en France, étant le plus souvent des personnalités isolées, et dont la parole n'a eu guère de portée dans l'opinion (en France, les exemples les plus connus sont le vulcanologue Haroun Tazieff, dans les années 1990, et le géologue et ancien ministre Claude Allègre, dans les années 2000).

[510] Richard S. Lindzen, qui avait débuté sa carrière en 1964 (PhD avec Richard Goody comme directeur), est alors Professeur de 'Meteorology' au MIT. Lindzen a maintes fois pourfendu ce qu'il appelle « le consensus sur le CC » (qui existerait au sein du GIEC, notamment) et l'« alarmisme climatique ». En 2013, il a pris sa retraite universitaire, et a intégré le 'think tank' libertarien 'CATO Institute'.

> produit du carburant [(du biogaz)]. L'intérêt de la Maison Blanche aida Kruger et l'*EPA* à initier un programme aux Etats-Unis, et à étendre son efficacité via une coopération avec plusieurs pays en voie de développement qui émettent plus de méthane que les Etats-Unis. Cette approche, étendue au globe, est meilleure que l'approche du Protocole de Kyoto, à mon avis. Cette approche avec le méthane est l'une des trappes de secours qui contraste avec l'approche inefficace de Kyoto, focalisée sur le dioxyde de carbone ('Methane is one of the escape hatches that make the Kyoto approach ineffectual for carbon dioxide' (*sic*)). » [Hansen, 2009, p. 52]

Avec cette phrase, boiteuse et emprunte d'une certaine naïveté, nous retombons, finalement, sur la logique des paniers de GES de Susan Solomon… tout le moins sur sa version "pragmatique" : enclencher coûte que coûte des réductions, sur plusieurs fronts, et en impliquant si possible les pays en voie de développement (que Hansen évoque explicitement). La question des co-bénéfices / dilemmes des politiques de l'atmosphère globale est particulièrement discutée aux Etats-Unis, dans la mesure où, bien que le pays soit "le plus développé", sa lutte contre les (gigantesques) émissions fossiles domestiques est sur de mauvais rails. L'administration états-unienne peut donc présenter sa lutte contre les GES de courte durée de vie comme une voie de compensation de sa lenteur à baisser ses émissions de CO_2… ce qui n'est pas le discours, insistons-nous, de ses scientifiques nationaux Solomon, Daniel, ni même Hansen, qui insistent tous pour que les "deux paniers" soient allégés simultanément.

Dilemme du soufre et géoingénierie chez Paul Crutzen

En fait, outre les collaborateurs européens de Solomon et Daniel (Jan S. Fuglestvedt du 'Center for International Climate and Environmental Research' d'Oslo) et Pierre Friedlingstein du 'College of Engineering, Mathematics and Physical Sciences' de l'Université d'Exeter), un auteur européen s'est frotté – et avec quel fracas ! – à la question des dilemmes entre gouvernances de l'atmosphère, mais dans une perspective sans lien avec l'élaboration d'objectifs différenciés de GES : pour promouvoir la recherche sur une technologie de géoingénierie. Traitant d'un cas particulier de « pacte faustien », qu'il appelait quant à lui plus modestement « dilemme politique », Paul Crutzen expliquait en effet, dans son « essai éditorial » publié dans *Climatic Change* en 2006, que plusieurs études récentes avaient montré que l'augmentation des concentrations en particules soufrées occasionnée par les activités humaines avaient un effet refroidissant sur la planète, ce qui « compensait » une fraction du réchauffement dû aux GES anthropiques (fraction qu'il était toutefois

difficile de déterminer précisément).[511] Or, les aérosols soufrés troposphériques détériorent la qualité de l'air.[512]

Comment, dès lors, « résoudre ce dilemme politique » ? Crutzen répond qu'une « contribution à » cette résolution pouvait se trouver dans une technologie de géoingénierie : il faudra peut-être envisager un jour l'injection d'aérosols soufrés dans la stratosphère, région dans laquelle nous n'inhalons pas l'air,[513] pour contrebalancer les efforts de réduction des concentrations en aérosols soufrés dans la troposphère qui seront "nécessairement" faits dans les pays en développement lorsque des technologies plus "propres" leur seront devenus abordables… Crutzen n'appelle pas 'a priori' de ses vœux cette « solution » géoingénierique, mais, dit-il, nous pourrions être "contraints d'y recourir" un jour, du fait de notre lenteur à réduire les GES, et par ailleurs notre obligation à réduire les pollutions de l'air. Voici en tout cas l'interprétation que la plupart des lecteurs ont donné à cet article. Et il est vrai que Crutzen écrit :

> « [L] e projet d'augmentation de l'albédo [par injection de soufre dans la stratosphère] devra être déployé seulement lorsque des bénéfices nets auront été démontrés ('when there are proven net advantages'), et en particulier lorsqu'un changement climatique rapide sera en train de se développer. »

Peu importe, à la limite, que le réchauffement soit dû, « paradoxalement, en partie à des améliorations de la qualité de l'air ». L'augmentation de l'albédo stratosphérique pourrait constituer à l'avenir « une possibilité pour combattre un potentiel réchauffement drastique du climat ». Crutzen réitéra d'ailleurs, au cours des années suivantes, son conseil de mener des études sur la GE, et en particulier sur la technologie d'injection d'aérosols dans la stratosphère… au cas où le climat tournait mal dans les décennies à venir. [Crutzen, 2006, pp. 211 & 216]

Toutefois, ailleurs dans le texte de 2006, Crutzen écrit :

> La petite quantité de soufre injectée dans la stratosphère « rendrait possible ('this would make it possible to...') la réduction de la pollution de l'air près du sol, améliorerait les

[511] Ce résultat a été depuis appuyé et popularisé par des auteurs de la NOAA, dont John Daniel [Howard Pankratz, 2011, "NOAA: Climate warming being reduced by particles in atmosphere", *The Denver Post*, Posted on 07/21/2011]. Daniel et Solomon ont par ailleurs travaillé sur un autre "masque" du CC, la vapeur d'eau stratosphérique. Sa diminution après l'an 2000 pourrait expliquer le ralentissement de l'augmentation de la température de surface observée au cours de la décennie 2000 [Solomon Susan, Karen H. Rosenlof, Robert W. Portmann, John S. Daniel, Sean M. Davis, Todd J. Sanford & Gian-Kasper Plattner, 2010, "Contributions of Stratospheric Water Vapor to Decadal Changes in the Rate of Global Warming", *Science*, 327(5970), 5 March 2010, pp. 1219-1223].

[512] En fait, ce dilemme entre qualité de l'air et CC existerait, au-delà des seuls aérosols soufrés, pour la plupart des aérosols d'origine anthropique, ainsi que des polluants organiques (à l'exception, peut-être, du carbone suie, dont le bilan global (positif ?, négatif ?) demeure très incertain). [Crutzen 2006, p. 211]

[513] De plus, le temps de résidence des aérosols soufrés dans la stratosphère est important (un an ou deux, contre une semaine environ dans la troposphère), donc la quantité d'aérosols soufrés à injecter serait relativement faible, souligne P. Crutzen. [Crutzen, 2006, p. 212]

> conditions écologiques et réduirait le changement climatique concomitant. » [Crutzen, 2006, p. 212]

… Ce qui signifierait que les réductions de polluants soufrés dans les villes *seraient conditionnées par le déploiement de la technologie géoingénierique* ! Ceci pose un double problème : (i) de pensée politique, puisque les pollutions de l'air et les GES n'obéissent pas aux mêmes gouvernances, et penser qu'elles puissent le faire est un vœux pieux ; (ii) alors que, dans ses autres écrits et en d'autres endroits du texte de 2006, Crutzen brandit le recours à la géoingénierie comme une menace, car comme un recours fâcheux mais nécessaire si les émissions de GES ne sont pas rapidement diminuées, il présente, dans cette phrase, la géoingénierie comme une aubaine.[514] Un tel argument n'a pas été repris depuis, à notre connaissance, dans la littérature scientifique avec comité de lecture.

Quant à l'idée selon laquelle il faudrait hésiter à procéder aujourd'hui à des diminutions drastiques de pollutions soufrées eu égard à leurs implications climatiques, elle a été balayée d'un revers de main par Mario Molina, qui a tranché :

> « Les considérations relatives à la qualité de l'air justifient à elles seules le besoin de réduire les émissions d'aérosols [réfléchissants], même si cela signifie que des contrôles plus stricts des gaz à effet de serre et carbone suie seront requis pour réduire proprement le risque de changement climatique. » [Molina, 2010, p. 161]

A ce stade (en 2014), les savoirs scientifiques pertinents pour définir des paniers de GES multiples, et pour soupeser les co-bénéfices/dilemmes entre le changement climatique et les autres problématiques de pollution atmosphérique, souffrent encore de grandes incertitudes. S. Solomon, J. Hansen et P. Crutzen donnent certes des avis de spécialistes reconnus sur les impacts multi-temporels des GES et sur les propriétés radiatives des aérosols soufrés. Conjointement, ils encouragent les recherches sur ces sujets (et, dans le cas de Crutzen, les recherches sur la géoingénierie). Mais, leurs prises de parole sonnent surtout comme une nouvelle tentative pour générer un "sursaut politique". L'accent mis sur les GES de courte durée de vie et les aérosols soufrés sont pour eux un nouveau prétexte pour mettre en garde contre la catastrophe climatique qui approche, et pour stimuler des réponses politiques rapides de lutte contre le changement climatique. D'une part, S. Solomon et P. Crutzen alertent en effet sur le risque de franchissement de limites environnementales globales critiques, ou « points d'inflexion ('tipping points') » du système Terre. D'autre part, l'accent

[514] Il faut ajouter, par ailleurs, que dans un article de 2004, Crutzen avait déjà disserté sur « les impacts des particules sur la santé humaine et le climat : un dilemme ? », avec son collègue Veerabhadran Ramanathan. La géoingénierie n'avait pas été évoquée. Une raison possible de ce choix : Crutzen *co*-signait ici l'article avec son collègue indien. A ce jour, ce dernier n'a produit aucun article sur la géoingénierie, et n'a pas, à notre connaissance, pris publiquement position sur le sujet. [Crutzen & Ramanathan, 2004, pp. 283-284 ; publications de V. Ramanathan recensées en ligne]

mis sur les composés de courte durée de vie sonne comme un appel à mettre en place promptement des politiques atmosphériques ambitieuses multi-polluant mutli-effet, dans un contexte d'augmentation générale des pollutions atmosphériques à l'échelle mondiale. Et, l'accent mis, y compris par le GIEC, sur les co-bénéfices qualité de l'air-climat que généreraient des réductions de NO_x, de monoxyde de carbone et de carbone suie, est un appel du pied, à peine masqué, fait aux pays en développement et aux grandes agglomérations.

Nous revenons sur l'action des "scientifiques du système Terre", et sur les possibilités politiques qu'ouvrent les réductions des GES de faible durée de vie à des échelles de décision multiples, dans la Conclusion générale. En outre, notre Partie C étant de nature plus "exploratoire" que les deux premières parties, nous ne proposons pas de "Conclusion de Partie C". Nous renvoyons dans la Conclusion générale les conclusions des Chapitres 7 à 9, ainsi que l'énonciation des perspectives de recherche qu'ils ouvrent.

Conclusion générale

A l'image de toute histoire "sociale" "sur le long terme" d'un champ et d'une communauté scientifique, notre histoire de la chimie atmosphérique globale ne propose qu'une description parmi de nombreuses autres possibilités. Notre récit identifie certaines des transformations qui ont marqué durablement les pratiques scientifiques d'étude sur la chimie atmosphérique globale ; il rend compte de reconfigurations disciplinaires et sociales fondatrices ; et, il analyse l'apparition de nouvelles formes d'expertise et de figures d'expert propres à ce champ d'étude. Toutefois, notre étude reste centrée sur des personnalités et des institutions ayant bénéficié d'une reconnaissance importante au sein de la communauté scientifique, ayant joué un rôle de premier plan dans l'élaboration de grands rapports d'expertise, et/ou ayant marqué de leur empreinte les controverses sociotechniques sur les pollutions atmosphériques transnationales et globales.

Il en résulte nécessairement que notre histoire laisse dans l'ombre voire occulte complètement certaines traditions locales de recherche : des traditions nationales (nous nous sommes principalement intéressé aux Etats-Unis et à la France) ; des réalisations et des stratégies de recherche propres à des institutions scientifiques particulières (par exemple, nous nous sommes attardé sur la NASA, aux dépens d'autres laboratoires états-uniens également très influents (NOAA, NCAR, LLNL)) ; des traditions instrumentales particulières (ainsi, nous avons décrit la construction d'un réseau de spectromètres au sol pour l'ozone et d'un réseau de mesures chimiques sur des retombées de polluants acidifiants, ainsi que la complexification des modèles numériques de chimie-transport, mais nous n'avons pas rendu compte de l'importance croissante prise à partir des années 1990 par les données spatiales pour établir plus finement la composition chimique de l'atmosphère, ni des pratiques de laboratoire (mesures des constantes de réaction chimique, chambres à smog)). De nombreuses histoires nationales sur la construction des expertises et des problèmes publics sur les pollutions atmosphériques depuis 1945 restent à écrire.[515]

En outre, contrairement à d'autres histoires disciplinaires, par exemple le travail de Peter Galison portant sur la « culture matérielle de la microphysique » (Galison, 1997) ou l'histoire de la construction d'un « globalisme infrastructurel » du changement climatique

[515] Le déficit d'étude est en tout cas patent pour l'Europe, dont la France. Il nous semblerait en particulier important de multiplier les histoires transversales qui embrasseraient plusieurs thématiques atmosphériques (pluies acides, destruction de la couche d'ozone, qualité de l'air, changement climatique), dans une perspective comparatiste qui confronterait les politiques de recherche et les mesures politiques dans les différents pays européens. De même, la description de la construction d'expertises et de politiques des pollutions atmosphériques au sein de la CEE et de l'UE a été seulement ébauchée.

par Paul Edwards (Edwards, 2006), notre histoire longue n'obéit pas à une méthodologie unique. Les approches que nous avons adoptées dans les différentes Parties ne sont pas identiques. Cette hétérogénéité méthodologique se justifie par le fait que nous ayons cherché à adopter, pour chaque "moment" étudié, la perspective la plus apte à saisir les transformations que nous avons jugées les plus décisives. Les pratiques et les discours des aéronomes et météorologistes au cours des années 1945-60 ne posent pas les mêmes questions que ceux des membres du CIAP lors de la controverse des SST et CFC aux Etats-Unis dans les années 1970, ni que ceux des chimistes de l'atmosphère globale "multiprimés" des années 2000.

Chaque reconfiguration demande à être analysée à l'aune des nouvelles oppositions, alliances et sympathies entre nos acteurs scientifiques et les différents acteurs avec lesquels ils sont amenés à dialoguer. Premièrement, notre histoire propose des analyses des débats entre scientifiques, qui font notamment apparaître des tensions disciplinaires. Deuxièmement, elle étudie la construction d'expertises, c'est-à-dire de savoirs et pratiques qui répondent à un désir de dialogue entre les scientifiques, et les décideurs politiques, la société civile et les industriels. Troisièmement, notre travail jette une lumière sur des formes de remise en question de la civilisation fossile et/ou de contestations des cadrages de gestion des pollutions atmosphériques sur le court, moyen et long terme, formulées par les scientifiques de l'atmosphère eux-mêmes. Leurs réquisitions et leurs plaidoiries, qui font échos à des discours de biologistes, d'écologues, d'économistes, d'historiens, *etc.*, s'inscrivent dans des cultures environnementales disparates.

Dans la Partie A, nous avons d'abord mis au centre du jeu une « culture matérielle », les mesures spectroscopiques. Nous avons montré qu'elles avaient bouleversé, à la fois la tradition de mesure des composés atmosphériques, dont l'ozone, et avaient fait office de « zone d'échange » (*cf.* Galison, 1997) entre plusieurs pratiques scientifiques, pour générer la première théorie photochimique de l'ozone stratosphérique (par S. Chapman, au tournant des années 1930). Puis, nous avons décrit le rôle joué par les spécialistes de la stratosphère des premières décennies de la Guerre froide, dans la construction d'un « environnement physique » global (*cf.* Doel, 2009) – ou, devrait-on dire, au sein d'un "environnement physico-*chimique* global".

Dans la Partie B, par le biais d'une étude de controverse, nous avons décrit les tensions qui marquent le passage d'un « régime de production des connaissances » à un autre dans les années 1970 (*cf.* Pestre, 2003 & 2006). Peu étudiée par les STS, l'entrée de la question de la destruction de la couche d'ozone dans les arènes politiques, médiatiques et réglementaires aux Etats-Unis engendre de multiples polémiques entre scientifiques, ainsi qu'entre des scientifiques de l'atmosphère qui découvrent pour la plupart le métier d'expert, et des

industriels, des décideurs politiques et des citoyens qu'il faut convaincre. Le "tournant environnementaliste" des années 1970 est une notion éminemment polysémique. Dans notre étude, elle recouvre une palette de réalités, à la fois contrastées, mais aussi qui s'interpénètrent en partie : la critique "altermondialiste" de Richard Scorer ; la quête d'un nouveau programme de recherche à la NASA ; les mises en garde de Bert Bolin à la tribune de l'UNCHE ; *etc.*

Dans la Partie C, nous avons montré le passage d'un contexte de production d'expertises nationales à un contexte de production d'une expertise internationale sur la destruction anthropique de la couche d'ozone, d'une part, et le changement climatique, d'autre part. Cette transition se fait sous égide de l'ONU, mais l'impulsion de grandes institutions de recherche états-uniennes est décisive. Le processus d'internationalisation accélérée de l'expertise sur l'ozone et le climat ne répond pas uniquement à la nécessité de multiplier les mesures à travers le monde afin de générer une science plus "robuste". La production d'un document unique faisant autorité dans la communauté scientifique, et la cooptation de scientifiques en provenance d'un nombre maximal de pays, doit faciliter la mise en œuvre de politiques de limitation des ODS et des GES à l'échelle internationale (de préférence, de manière coordonnée). Le nouveau type d'expertise sur les pollutions atmosphériques globales qui naît dans les années 1980 se caractérise également par l'utilisation de "modèles intégrés" devant construire des futurs possibles afin de guider l'action politique (*cf.* Dahan-Dalmedico (Dir.), 2007), et par l'invention d'indices environnementaux (ODP, charge en chlore, GWP), qui doivent servir "d'objets frontières" entre pouvoirs publics et industriels, et entre les différents Etats.

En outre, la signature du Protocole de Montréal en 1987, et la remise du Prix Nobel de Chimie à Paul Crutzen, Mario Molina et Sherwood Rowland en 1995, consacrent la science de l'ozone, et assoient la légitimité de la chimie atmosphérique au sein de la communauté scientifique (alors que les chimistes de l'atmosphère étaient auparavant fréquemment décriés, par des météorologistes en particulier). De plus, les 'Assessments of Ozone Depletion' et les rapports du GIEC ont acquis une autorité peu contestée, que ce soit au sein de la communauté scientifique, ou dans les arènes de négociations internationales, dans les médias, dans les collectifs de défense de l'environnement. En 2007, un Prix Nobel de la paix est même attribué au GIEC « en reconnaissance de son action menée pour rassembler et diffuser les connaissances sur les changements climatiques anthropiques et jeter ainsi les bases des politiques à mettre en œuvre pour en contrer les effets ». A la faveur de la reconnaissance publique de l'expertise internationale sur la destruction de la couche d'ozone et sur le changement climatique, les chimistes de l'atmosphère globale qui y collaborent accèdent à un statut supérieur.

A nouveau, la nature et les répercussions des prises de parole de nos acteurs évoluent ; et, avec elle, notre corpus et notre manière de traiter les discours de ces acteurs. Il faut désormais comprendre dans quelle rhétorique, dans quel projet politique s'insère la très renommée Susan Solomon, lorsqu'elle signe un article "Atmospheric Composition, Irreversible Climate Change, and Mitigation Policy" dans un ouvrage collectif publié sous le titre *Climate Science for Serving Society. Research, Modeling and Prediction Priorities* (Solomon *et al.*, 2013). Il faut expliquer la démarche de Michael McElroy au sein du « 'Harvard China Project' » (de la 'Harvard School of Engineering and Applied Sciences'), « un programme de recherche interdisciplinaire » et « en collaboration avec des instituts de recherche chinois », portant sur « l'environnement atmosphérique de la Chine, son système énergétique et son économie ».[516] Il faut apprécier les discours de Ralph Cicerone sur la géoingénierie à l'aune de son statut de Président de l'Académie des sciences des Etats-Unis (Cicerone, 2006). Il faut étudier les discours et les profils des contributeurs des ouvrages trans-/inter-disciplinaires sur « la durabilité globale », que coédite depuis une quinzaine d'années le climatologue Hans Schellnhuber, fondateur et directeur du 'Postdam Institute for Climate Impact Research' (PIK ; 1992-…), Prix Nobel de la paix avec le GIEC, et l'une des principales figures du programme d'étude IGBP sur le système Terre.[517] Ce corpus offre des perspectives de recherche multiples, notamment au sujet des usages que les scientifiques font des concepts d'Anthropocène (notion dont on doit notamment la popularisation à P. Crutzen), de « Seconde révolution copernicienne » et de « durabilité globale » (chers à H. Schellnhuber), de Gaia, *etc*.[518] (Dans la deuxième partie de notre conclusion, qui suit, nous revenons sur quelques résultats que mettent en avant des scientifiques du système Terre.)

---

[516] *Site de l'Université de Harvard*, 2014, http://chinaproject.harvard.edu/ (30/10/2014)

[517] Signalons ici deux ouvrages importants. D'une part, *Earth System Analysis for Sustainability*, rapport tiré du 91ème Workshop de Dahlem, qui s'ouvre sur un "Chapter 1. Science for Global Sustainability: Toward a New Paradigm", co-signé par H. Schellnhuber, P. Crutzen et William Clark, un politiste de Harvard (Schellnhuber *et al.* (Ed.), 2004). D'autre part, l'ouvrage *Global Sustainability. A Nobel Cause* (Schellnhuber *et al.* (Ed.), 2010), préfacé la Chancelière allemande Angela Merkel, dans lequel se côtoient un article du Prix Nobel d'économie Nicholas Stern [Stern & Garbett-Shiels, 2010, "Towards a global deal on climate change"], un article du Président du GIEC Pachauri Rajendra dans lequel il feint de découvrir que « l'existence même d'une courbe environnementale de Kuznets pour les polluants globaux comme le dioxyde de carbone est contestable » [Pachauri, 2010, "Insights into the climate challenge"], ou encore un article de Mario Molina qui, se plaçant sous l'autorité de N. Stern, assure qu'« il existe déjà des technologies disponibles, dont le déploiement pourrait être entrepris rapidement dans un futur proche, et dont résulterait une réduction significative d'émissions de gaz à effet de serre à un coût relativement modeste, à savoir quelques pourcent de PIB mondial. » [Molina, 2010, "Climate change – learning from the stratospheric ozone challenge"]

[518] Un travail de comparaison reste à effectuer entre les théories scientifiques de l'Anthropocène, de Gaia, et d'autres grands récits de l'environnement global. Les débats et tentatives de clarification se sont multipliées depuis la fin des années 1990 au sein de la littérature scientifique (voir e.g. Margulis, 2012 (1998) ; Lenton *et al.*, 2004 ; Schneider *et al.*(Ed.), 2008 (2004) ; Crist & Rinker (Ed.), 2010). Les philosophes et historiens des sciences ont également commencé à apporter des éclairages sur la genèse et les implications philosophiques et politiques de ces théories proposées par des scientifiques. Citons, au sujet de Gaia, l'ouvrage de Michael Ruse, "The Gaia Hypothesis: Science on a Pagan Planet" (Ruse, 2013). Des travaux d'analyse du programme politique de la science du système Terre et des scientifiques porteurs de la notion d'Anthropocène ont en outre été initiés dans la communauté des SHS / STS, notamment autour d'Eva Lövbrand, de l'Université de Linköping (Suède). Voir notamment l'article

Notre histoire de la chimie atmosphérique globale louvoie entre une histoire des sciences sur la longue durée centrée sur un champ scientifique, la "problématique STS" de l'expertise, et l'histoire environnementale. Malgré l'hétérogénéité des approches utilisées, la nécessité que nous avons ressentie de nous arrêter sur des moments particuliers pour en saisir plus finement les implications, et notre volonté de nous polariser sur des individus et institutions particuliers afin d'appréhender leurs stratégies, notre récit n'en garde pas moins un cap bien défini. Il offre une description dynamique de certaines pratiques matérielles, discursives et sociales d'un champ académique construisant un "morceau", une "version" de l'environnement global.

En outre, notre travail peut contribuer à réinterroger la "crise" actuelle de la gouvernance climatique, et plus généralement la "crise" environnementale mondiale liée aux pollutions atmosphériques, qui correspond à une situation d'explosion des émissions dans les grands pays dits « émergents », et de maintien des pollutions à un niveau élevé dans les pays de l'OCDE.[519] Nous insistons en ce sens, pour finir, sur deux thématiques transversales de notre thèse, qui ouvrent sur de multiples pistes de recherche possibles au sujet de l'expertise contemporaine des pollutions atmosphériques.

Première thématique. Notre thèse a fait une histoire de la construction d'*une « globalité » scientifique* particulière : un « environnement atmosphérique global chimiquement réactif ». L'étude des spectres solaires depuis le sol s'est trouvée au cœur du renouvellement des sciences de l'atmosphère à la fin du XIX^{ème} siècle et au début du XX^{ème} siècle, à la fois dans la genèse de la théorie sur ce que nous appelons aujourd'hui "l'effet de serre", et dans le développement d'études instrumentales fines sur la composition atmosphérique (dont l'ozone, mesuré principalement à l'aide de spectromètres). Mais, alors que, en 1885, l'Académie des sciences de Paris avait mis au concours la question suivante : « Distribution de la chaleur à la surface du globe. Rechercher par la théorie suivant quelles lois la chaleur solaire arrive aux différentes latitudes du globe terrestre dans le cours de l'année en tenant

programmatique Lövbrand *et al.*, 2009, "Earth System governmentality. Reflections on science in the Anthropocene".

Par ailleurs, une étude plus réflexive pourrait être entreprise au sujet de la littérature de SHS qui utilise les concepts de Gaia et de l'Anthropocène – souvent pour mieux rompre avec les types de récits 'mainstream' qu'ont construits des scientifiques de la nature autour de ces notions, et proposer des programmes politiques tout autres (nous pensons par exemple à Litfin, 2005, Stengers, 2009, Bonneuil & Fressoz, 2013).

[519] Rappelons simplement quelques estimations chiffrées relatives à la qualité de l'air dans le monde. Les experts de l'OMS (Organisation mondiale de la santé) ont estimé que les pollutions urbaines induisaient plusieurs centaines de milliers de morts prématurées par an, aussi bien en Inde qu'en Chine, et environ 40 000 aux Etats-Unis (pour un total de 3,7 millions de morts prématurées dans le monde liées à la pollution de l'air extérieur – alors que la pollution de l'air intérieur occasionnerait environ 4,3 millions de morts prématurées par an) [*OMS (Site web de l')*, 2014 (mars), http://www.who.int/mediacentre/factsheets/fs313/en/ & http://www.who.int/mediacentre/factsheets/fs292/en/ (05/08/2014)]. Dans l'agglomération parisienne, les pics de pollution se sont multipliés au cours des dernières années, poussant l'Union européenne à menacer l'Etat français de pénalités financières.

compte de l'absorption atmosphérique. Faire une étude comparative de la distribution des températures données par les observations », le projet de l'IGBP à sa création en 1986 est énoncé comme suit : « décrire et comprendre les processus *d'interactions physiques*, *chimiques* et *biologiques* qui régulent l'ensemble du système Terre, le seul environnement qui apporte la vie, ainsi que les changements qui se produisent dans le système et la manière dont les facteurs humains participent à ces changements » [Lions, 1989, pp. 5-6]. Trois mutations profondes se sont en effet produites au sein des sciences de l'atmosphère et des géosciences au cours du XX^{ème} siècle (et en particulier dans la seconde moitié du XX^{ème} siècle) : l'entrée de l'humanité parmi les forces géologiques (qui entre désormais "en compétition" avec les phénomènes naturels) ; l'avènement de la science des systèmes (avec leurs rétroactions, leurs points d'équilibres, *etc.*) ; la place accordée aux phénomènes « chimiques » et « biologiques » aux côtés des phénomènes physiques.

Comme nous l'avons montré, la place accordée à la chimie dans la formalisation de l'environnement global est, d'une part, grandement tributaire de l'élaboration de cycles biogéochimiques globaux. Cette théorisation s'est faite principalement à la jonction de la biologie (terrestre, océanique) et des sciences de l'atmosphère. Par exemple, dans les années 1970, l'hypothèse Gaia naît notamment de la collaboration de la microbiologiste Lynn Margulis avec le scientifique des atmosphères planétaires James Lovelock. Et, ce dernier souligne alors l'importance d'élaborer une chimie troposphérique digne de ce nom. D'autre part, la place accordée à la chimie dans l'environnement global doit beaucoup à "l'événement trou de la couche d'ozone". En effet, il attesterait du fait que l'action de l'homme puisse induire des déséquilibres chimiques dans le "système environnement" global, y compris lorsque les concentrations de polluants injectés dans l'atmosphère (CFC, halons, *etc.*) restent faibles par rapport aux autres gaz traces atmosphériques (méthane, ozone, protoxyde d'azote N_2O, *etc.*).

Dans l'ouvrage *Earth System Analysis for Sustainability*, les auteurs du Chapitre 16 "Group Report: Earth System Dynamics in the Anthropocene", qui comptent parmi eux P. Crutzen et B. Bolin, déclarent qu'« une inquiétude sur la stabilité des systèmes chimiques » est née suite à la découverte "empirique", "fortuite" de formation d'un trou de la couche d'ozone au-dessus de l'Antarctique. Selon les scientifiques, au même titre que « la capacité de l'humanité à changer directement les cycles biogéochimiques », la formation d'un trou d'ozone d'origine anthropique constitue l'un des indices d'entrée dans « une nouvelle phase, qui constitue un changement qualitatif ou un changement de seuil ('a qualitative or threshold shift') ». La destruction de l'ozone polaire fournit une preuve que l'homme est en capacité de provoquer par ses activités des phénomènes de déséquilibres chimiques *globaux*, *à moyen et long terme* (« la fermeture du trou d'ozone devrait prendre au moins quatre ou cinq

décennies, malgré la réduction des émissions de CFC qui a suivi le Protocole de Montréal », précisent les auteurs), et *que les scientifiques ne pourraient pas nécessairement anticiper à l'aide de leurs théories*. [Steffen *et al.*, 2004, pp. 321-322 & 333]

Est-ce à dire que la science est inapte à ce jour à saisir ces « discontinuités » du système Terre ? *Oui, mais*, arguent les scientifiques du système Terre, ils pourraient *adapter leurs méthodes* au défi lancé par le nouvel état de la planète. La tâche doit être prise à bras-le-corps, et instamment, martèlent le géochimiste et océanographe Meinrat Andreae et ses deux collègues dans le même ouvrage. « Dans ce moment de l'histoire où les activités humaines sortent de la fourchette des paramètres connus à presque tous égards (la composition atmosphérique, l'occupation des sols, la démographie, pour ne donner que quelques exemples), où nous allons d'une « surprise » à l'autre (blanchissement des coraux et disparition des récifs, apparition de trous de l'ozone polaire, émergence du SIDA et autres maladies des forêts tropicales), nous dev[ons] nous tenir en alerte [, nous tenir prêts à répondre à] des changements soudains » [Andreae *et al.*, 2004, p. 260]. Toujours dans le même ouvrage, dans le chapitre introductif, P. Crutzen, H. Schellnhuber et W. Clark expliquent qu'ils ont, en ce sens, esquissé « un programme hilbertien pour la Science du Système Terre » (qu'ils présentent sous la forme d'un tableau rempli de questions de recherche pour le moins ambitieuses…) [Clark *et al.*, 2004, pp. 8-9].

Dans ce programme d'« analyse des systèmes » appliquée au Système Terre devant assurer la « durabilité globale », il est notamment question de déceler les « points d'inflexion ('tipping points') » et les comportements chaotiques du système Terre, et d'identifier les régions du monde qui seraient les plus vulnérables aux changements en cours. De nombreuses questions jaillissent alors. Quelle confiance faut-il accorder aux simulations numériques des 'Earth System Models' ? Les arguments des scientifiques du système Terre visent-ils un objectif autre que celui de susciter une "urgence à agir", un sentiment qu'"il va falloir jouer serré", que l'on ne peut plus se permettre de faire de nouvelles erreurs d'aiguillage dans nos actions politiques ? Ce type d'argument n'a-t-il pas tendance à favoriser les réponses technocratiques et les infrastructures technologiques les plus gigantesques (centrales nucléaires, grands barrages, technologies de captation et séquestration du CO_2, géoingénierie, *etc.*), c'est-à-dire à reconduire une « stratégie du choc » (*cf.* Klein, 2008 (2007)) ? En tout cas, certains scientifiques du changement climatique et du système Terre attisent aujourd'hui le sentiment d'urgence, tout en faisant la promotion d'un modèle technophile et technocratique dont ils sont amenés à devenir les héros (aux côtés des ingénieurs et des entrepreneurs).[520] Mais, d'autres scientifiques du système Terre ne

[520] Dans le Chapitre 8, nous avons illustré ce "scientisme" par une citation de Paul Crutzen et Eugene Stoermer, qui, après nous avoir annoncé que nous nous trouvions, sans le savoir, dans l'Anthropocène, déclaraient qu'« une tâche

défendent-ils pas, par ailleurs, des modèles politiques tout différents ?... Décrire la complexité, la diversité de la science / des sciences du système Terre (par exemple, du programme de l'IGBP), qui intègre des chimistes de l'atmosphère mais fait collaborer de multiples communautés des sciences de la nature et des SHS travaillant dans une multitude de pays, requerrait une analyse propre, qui reste à faire.

Second point. La notion scientifique « d'environnement global » que portent les sciences de la couche d'ozone, du changement climatique et du système Terre entre en conflit avec une expérience plus commune, plus "vécue" de « l'environnement », qui relève de l'immersion, de l'inéluctable intrication entre un individu et ce "dehors" qui n'en est pas un. Elle rentre aussi en conflit avec toutes les échelles décisionnaires du politique. De l'injonction à « consommer local » à la construction d'un droit international de l'environnement, toute forme d'action politique de protection de l'environnement global se construit par la création de collectifs et par la norme.

Ainsi, nous ne pouvons nullement espérer nous représenter aujourd'hui la forme que prendra peut-être un jour "quelque gouvernance du système Terre", qui s'attaquera conjointement à "toutes" les problématiques globales tout en assurant ne pas "sacrifier" les environnements locaux. Par contre, dans notre thèse, nous avons vu se construire les gouvernances internationales de l'ozone et du climat. Or, alors que les experts et diplomates de l'ozone ont cheminé vers un protocole qui restreint fortement la consommation mondiale d'ODS, la gouvernance climatique reste moribonde. Une fois épuisées les déclarations de bonnes intentions appelant à reproduire le modèle de la gouvernance de l'ozone, il faut bien finir par prendre acte que le cadrage du changement climatique, qu'il soit "bon sur un plan éthique" ou non, est aujourd'hui en échec. En tout cas, le constat est implacable en ce qui concerne les politiques d'émissions de CO_2. Une stabilisation des concentrations de CO_2 impliquerait une remise en question de l'ensemble de notre appareil de production et de consommation, à commencer par notre appareil énergétique. Les communautés (pays, agglomérations, collectifs de citoyens) qui ont endossé cette responsabilité de changement demeurent pour le moment très minoritaires.

Mettons de côté la géoingénierie, qui pose des problèmes de gouvernance internationale semble-t-il dirimants (ce qui ne signifie pas qu'aucune technologie de géoingénierie ne sera jamais déployée !). Comment les chimistes de l'atmosphère peuvent-ils espérer guider les politiques climatiques ? En d'autres termes, comment relocaliser la

stimulante, mais aussi difficile et intimidante, attend[ait] la recherche sur le global et la communauté des ingénieurs, pour guider l'humanité vers une gestion ('management') globale et durable de l'environnement. » [Crutzen & Stoermer, 2000, p. 18]

problématique globale du changement climatique ? Le moyen le plus direct, bien sûr, est l'adaptation. De ce côté, les chimistes peuvent faire prévaloir leur capacité à réaliser des simulations numériques par 'downscaling', afin de mieux anticiper les effets du changement climatique sur la formation de smog. Mais, la tâche la plus difficile réside bien sûr dans la réduction des émissions de GES. Dans un contexte où les émissions de CO_2 continuent à s'accumuler de manière de plus en plus rapide dans l'atmosphère,[521] réduire les GES de courte durée de vie devient une option politique séduisante. Les chimistes peuvent, par exemple, expliquer comment limiter au mieux la production d'un polluant secondaire tel que l'ozone troposphérique.

Mais, la problématique des GES autres que le CO_2, que S. Solomon, par exemple, pousse sur le devant de la scène, *dépasse largement le cadre d'expertise des chimistes*. Lorsque les chimistes de l'atmosphère encouragent des "*co-bénéfices*" ou des "*politiques multi-polluant multi-effet*", *ils inscrivent leurs déclarations dans une* "*bulle discursive*" qui leur préexiste, et au sein de laquelle leurs conclusions vont être mobilisées, réinterprétées, et utilisées à des fins diverses. Aujourd'hui, la rhétorique des "*co-bénéfices*" et des "*politiques multi-polluant multi-effet*" est portée par des acteurs hétéroclites : des Etats ne souhaitant pas consentir à des réductions de CO_2 à des coûts importants et/ou des Etats lancés dans un processus d'industrialisation accélérée qui s'accompagne d'immenses problèmes d'insalubrité de l'air ;[522] des auteurs académiques défendant une vision libérale, incitative de la gouvernance climatique (par exemple, les auteurs du *Hartwell paper*, qui signalent que la baisse des taux d'ozone troposphérique et de carbone suie pourrait contribuer de manière significative à la lutte contre le changement climatique tout en améliorant la qualité de l'air [Prins *et al.*, 2010]) ; des acteurs œuvrant pour une relocation, une "ré-internalisation" des pollutions dans l'économie des territoires, et misant beaucoup sur l'exemplarité ("villes zéro-carbone", éco-

[521] Selon les projections d'experts en énergie, le XXI^{ème} siècle verra d'abord une flambée spectaculaire du charbon (en 2017, la consommation mondiale de charbon dépassera celle du pétrole), suivie à moyen terme d'« un âge d'or du gaz naturel ». [Kahn (Prod.), 2014]

[522] La thématique des « co-bénéfices » se répand aujourd'hui rapidement dans les milieux de l'expertise sur les stratégies climatiques. Ainsi, lors de la 'Better Air Quality 2010 conference' de Singapour, un consortium est-asiatique 'Asian Co-benefits Partnership' (ACP) a été créé. Sa formation découlait du constat suivant :

> "In recent years, a variety of stakeholders in Asia have demonstrated that integrating co-benefits into decision-making processes can reduce GHG mitigation costs or bring carbon finance to development needs. However, the absence of a mechanism to share information and coordinate stakeholders on these issues has hampered mainstreaming co-benefits into national development strategies and plans as well as sectoral policies, programs, or projects in Asia."

Le secrétariat de l'ACP est assuré par l'Institute for Global Environmental Strategies' (IGES ; Kanagawa, Japan), établi à l'initiative du Gouvernement japonais en 1998, afin de conduire « une recherche pragmatique et innovante sur la stratégie politique à adopter pour soutenir le développement durable dans la région Asie-Pacifique », est-il écrit sur son site. Le Groupe de conseil de l'ACP a pour membres des représentants de pays asiatiques, le 'Policy Research Center for Environment and Economy' (PRCEE) de Chine, les ministères de l'environnement d'Indonésie, du Japon, de Thaïlande, ainsi que des organisations internationales : le 'Clean Air Initiative for Asian Cities' (CAI-Asia), le 'Global Atmospheric Pollution Forum' (GAPF), l'United Nations Economic and Social Commission for Asia and the Pacific (ESCAP) et l'UNEP. [http://www.cobenefit.org/about/index.html#about ; http://en.openei.org/wiki/Institute_for_Global_Environmental_Strategies_(IGES) (10/04/2014)]

quartiers, formes multiples de relocalisation de l'économie, nouvelles pratiques de "consommation", *etc.*) ; *etc.*

Quoiqu'il en soit, les "co-bénéfices / dilemmes" et les approches "multi-polluant multi-effet", d'une part, et les programmes politiques qu'encouragent les différentes "écoles" de la science du système Terre, d'autre part,[523] ne manqueront pas de susciter des programmes de recherche en SHS, qui pourront dialoguer, espérons-nous, avec le présent travail. En hiérarchisant les pollutions en fonction de leur urgence à faire l'objet de réglementations, et en pointant du doigt les effets synergiques ou "contradictoires" de plusieurs gouvernances des pollutions (par le biais de simulations numériques, de l'élaboration de nouveaux indicateurs environnementaux, *etc.*), les scientifiques de l'atmosphère globale joueront nécessairement un rôle de cadrage et de suivi des politiques de pollution atmosphérique à l'avenir. Des politiques qui, par leurs normes, par leurs jeux d'échelles spatiales et temporelles, par leur capacité à mobiliser, seront autant de reconfigurations de l'ordre social, des ordres sociaux à travers le monde.

Régis Briday, le 4 novembre 2014.

[523] Rappelons en outre que les deux aspects "co-bénéfices" et "points d'inflexion du système Terre" à ne pas franchir, sont parfois associés, comme c'est le cas dans l'article Solomon *et al.*, 2013, que nous avons analysé dans notre Chapitre 9.

Bibliographie

Abeysinghe S., 2011, 'Risk in the Context of Scientific Uncertainty: The WHO's Construction of H1N1', *The Australian Sociological Association Conference*, Newcastle, Nov 28th - Dec 1st, http://www.tasa.org.au/uploads/2011/11/Abeysinghe-R0062-Final1.pdf (12/01/2013), 17 pages.

Accent, 2009, "Appendix. ACCENT: The account of a successful story: A short summary of the goals, organisation and achievements of the European Network of Excellence "Atmospheric Composition Change: the European Network" (ACCENT), *Atmospheric Environment*, Volume 43, Issue 33 (October 2009), « ACCENT Synthesis », pp. *5433-5438*.

Ackerman Marcel & Jaumotte André, 2011, « Marcel Nicolet », Biographie de Marcel Nicolet, *Site Internet de l'Académie Royale de Belgique*, http://www2.academieroyale.be/academie/documents/NICOLETMarcelARB_19983 8605.pdf (02/04/2011), pp. 31-49.

Adel Arthur, 1938, "Further Detail in the Rock-Salt Prismatic Solar Spectrum", *Astrophysical Journal*, vol. 88, pp.186-188

Aftalion Fred, 1988, *Histoire de la Chimie*, édition Masson, Paris.

Agrawala Shardul, 1998 (1), "Context and Early Origins of the Intergovernmental Panel on Climate Change", *Climatic Change*, 39, pp. 605-620.

Agrawala Shardul, 1998 (2), "Structural and Process History of the Intergovernmental Panel on Climate Change", *Climatic Change*, 39, pp. 621-642.

AIP (American Institute of Physics)'s website, 2011, http://www.aip.org/history/climate/co2.htm#M_4_ (11/10/2011)

Air Quality Expert Group (UK), 2009, *Ozone in the United Kingdom*, Prepared for: Department for Environment, Food and Rural Affairs; Scottish Executive; Welsh Assembly Government; and Department of the Environment in Northern Ireland, Crown, 239 pages

Akasofu Syun-Ichi, Fogle Benson & Haurwitz Bernhard (eds.), 1968, *Sydney Chapman, Eighty: From His Friends* ; extracts **in** *Website of the Geophysical Institute of the University of Alaska Fairbanks*, 2011, "Sidney Chapman Page", University of Alaska Fairbanks, http://www2.gi.alaska.edu/chapman (25/02/2011); Read more: http://www.answers.com/topic/sydney-chapman-1#ixzz1ebriWvsZ (25/02/2011)

Allamel-Raffin C., 2004, *La production et les fonctions des images en physique des matériaux et en astrophysique – Volume I*, Thèse, Université Louis Pasteur, Strasbourg I, pp. 1-213.

Aman Alfred, 1993, "Introduction: the Montreal Protocol and the Future of Global Legislation", *Law & Policy*, Volume 15, Number 1, January 1993, article revised for publication after a paper presented at the symposium "Above the boundaries: Ozone Depletion, Equity and Climate Change" (annual meeting of the Law and Society Association in Philadelphia in May, 1992), pp. 1-13.

Andersen Stephen & Sarma Madhava, 2002, *Protecting the Ozone Layer – the United Nations History*, UNEP "Earthscan", 513 pages.

Andreae M.O., Talaue-McManus L. & Matson P.A., 2004, "Chapter 13. Anthropogenic Modification of Land, Coastal, and Atmospheric Systems as Threats to the Functioning of the Earth System" **in** Schellnhuber *et al.* (Ed.), 2004, pp. 245-264

Anderson Kevin & Alice Bows, 2012, "A New Paradigm for Climate Change", *Nature Climate Change*, 2012, pp. 639-640.

Anderson Kevin & Alice Bows, 2008, "Reframing the climate change challenge in light of post-2000 emission trends", *Phil. Trans. R. Soc. A*, 366, pp. 3863-3882

Andonova Liliana, 2007, "Chapter 8: Acid Rain in a Wider Europe: The Post-Communist Transition and The Future European Acid Rain Policies" **in** Visgilio & Whitelaw (Ed.), 2007, *Acid in the Environment: Lessons Learned and Future Prospects*, Springer Science & Media, pp. 151-174.

APPA (l'Association pour la Prévention de la Pollution Atmosphérique) (Site web de), 2014, « Cinquante ans d'action de l'APPA », http://www.appa.asso.fr/national/Pages/article.php?art=348 (15/09/2014)

Aristote, 2008, *Météorologiques*, Gallimard, Collection *tel*, édition établie par Pierre Thillet, 616 pages.

Arléry R., 1961, « Météorologie : Douzième Assemblée générale de l'Association Internationale de Météorologie et de Physique de l'Atmosphère (IAMAP), Helsinki, août 1960 », compte-rendu de ladite assemblée, *Annales de Géographie*, Vol. 70, n° 377, pp. 98-100.

Armatte Michel & Amy Dahan, 2014 (à paraître), « Modélisation : de la représentation à la simulation et l'action » **in** Bonneuil C. & D. Pestre (Ed.), 2014, *Encyclopédie d'Histoire des Sciences*, Seuil, 16 pages, communication personnelle.

Armatte Michel & Amy Dahan Dalmedico, 2004, « Modèles et modélisations, 1950-2000 : Nouvelles pratiques, nouveaux enjeux », *Revue d'Histoire des Sciences*, 2004, Vol. 57, n° 2, pp. 243-303.

Arrhenius Svante, 1910 (1907), *L'évolution des mondes*, Ed. : Librairie polytechnique Ch. Boulanger ; traduit de l'anglais (*Worlds in the Making*, 1908, New York: Harper & Brothers) par T. Seyrig ; titre original : *Das Werden der Welten*, 1907.

Arrhenius Svante, 1896, "On the Influence of Carbonic Acid in the Air upon the Temperature of the Ground", *Philosophical Magazine*, Ser. 5, vol. 41, pp. 237–276.

Atkinson Edward Stevens Jr., 1982, « Chlorofluorocarbons and Stratospheric Ozone: Regulatory Background », *The American Statistician*, Vol. 36, No. 3, Part 2: Proceedings of the Sixth Symposium on Statistics and the Environment (Aug., 1982), pp. 301-302

Aumont Bernard, 2014, « Introduction à la modélisation de la chimie atmosphérique », LISA, UMR CNRS 7583, Créteil, http://www.lisa.u-pec.fr/~aumont/contenu/enseignement/M2_SGE/modelisation_short.pdf (05/03/2014), 60 diapositives.

Aumont Bernard, 2005, « Modélisation de la chimie troposphérique », *Mémoire présenté pour l'obtention du Diplôme d'Habilitation à diriger les recherches*, soutenu le 12 décembre 2005, *Université Paris 12 – Val de Marne UFR de Sciences et Technologie*, 130 pages

Aykut Stefan & Amy Dahan, 2014 (à paraître), « La gouvernance du changement climatique. Anatomie d'un schisme de réalité » **in** Pestre D. (ed.), 2014, *Gouverner le Progrès et ses Dégâts*, La Découverte, communication personnelle.

Aykut Stefan, 2012, *Comment gouverner un 'nouveau risque mondial' ? La construction du changement climatique comme problème public à l'échelle globale, européenne, en France et en Allemagne*, mémoire de thèse pour l'obtention du titre de docteur en sciences sociales à l'EHESS (direction : Amy Dahan ; soutenance le 30 mai 2012), Spécialité « Sciences sociales », 741 pages, document disponible en ligne à l'adresse http://tel.archives-ouvertes.fr/docs/00/75/71/06/PDF/ThA_se_Deux_Tomes.pdf (16/08/2014).

Aykut Stefan & Amy Dahan, 2011, « Le régime climatique avant et après Copenhague: sciences, politiques et l'objectif des deux degrés », *Natures, Sciences, Sociétés,* 2011, n° 19, pp. 144-157.

Bachelard Gaston, 1940, *La Philosophie du non : Essai d'une philosophie du nouvel esprit scientifique*, P.U.F.

Bachmann John, 2007, "Will the Circle Be Unbroken: a History of the U.S. National Ambient Air Quality Standards", *Journal of the Air & Waste Management Association*, Vol. 57, pp. 652-697.

Badash Lawrence, 2009, *A Nuclear Winter's Tale. Science and Politics in the 1980s*, MIT Press, 407 pages

Barbier Daniel & Chalonge Daniel, 1942, *De la Stratosphère à l'Ionosphère*, Presses Universitaires de France, Collection « La Science Vivante », 157 pages.

Barbier Daniel, 1934, « 'Distribution of atmospheric ozone as a function of height'. La répartition de l'ozone atmosphérique en fonction de l'altitude », *J. Phys. Radium 5 (6)*, pp. 243-252.

Barca Stefania, 2011, "Energy, property, and the industrial revolution narrative", *Ecological Economics*, Volume 70, Issue 7, 15 May 2011, pp. 1309-1315

Bates D.R. & Hays P.B., 1967, "Atmospheric Nitrous Oxide", *Planetary and Space Science*, Volume 15, Issue 1, January 1967, Pages 189-197.

Bates David R. & Marcel Nicolet, 1950, "The photochemistry of atmospheric water vapor", *Journal of Geophysical Research*, Volume 55, Issue 3, September 1950, pp. 301–327

Beck Ulrich, 2008 (1986), *La Société du risque : Sur la voie d'une autre modernité*, Flammarion, « Champs », Essais, 524 pages

Beekmann Matthias, 2011, Retranscription de l'entretien de Matthias Beekmann, chimiste de la basse atmosphère au LISA, effectué par l'auteur ; à Créteil (bâtiments du LISA), le 26 juillet 2011.

Beller Mara, 2004, "Neither Modernist nor Post-Modernist – A Third Way" **in** Carrier M., Roggenhofer J., Küppers G. & Blanchard P. (Eds.), 2004, *Knowledge and the World: Challenges Beyond the Science Wars*, Springer, Series "The Frontiers Collection", pp. 265-292.

Benedick Richard Elliot, 1991, *Ozone Diplomacy: New Directions in Safeguarding the Planet*, Cambridge: Harvard University Press, 293 pages.

Bensaude-Vincent Bernadette & Stengers Isabelle, 2001 (1991), *Histoire de la chimie*, La Découverte & Syros, Paris, 360 pages.

Bernier Aurélien, 2008, *Le climat otage de la finance. Ou comment le marché boursicote avec les droits à polluer*, Mille et une nuits, Essai, 164 pages.

Berthet G., 2002, *Etude de la répartition verticale des composés stratosphériques minoritaires mesurés par l'instrument SALOMON*, « Chapitre 1 : Introduction générale et Contexte de l'étude », Thèse, Université d'Orléans, novembre 2002, pp 11-39.

Bezverkhniy Sh.A., Osherovich A.L. & Rodionov S.F., 1960, *Mezhdunarodnyy Geofizicheskiy God, …*, pp. 81-104; translated in an English version as "Photoelectric Ozonometers", and distributed by U.S. JOINT PUBLICATIONS RESEARCH SERVICE OFFICE OF TECHNICAL SERVICES U.S. DEFARTMENT OF COMMERCE WASHINGTON 25, D. C., JPRS: 9291, CSO:6064-N-3, 19 May 1961 "library copy on JUNE 9, 1961", AD-A280 855, handle.dtic.mil/100.2/ADA280855 (03/10/2014), pp. 1-53.

Blackmon Maurice, Byron Boville, Frank Bryan, Robert Dickinson, Peter Gent, Jeffrey Kiehl, Richard Moritz, David Randall, Jagadish Shukla, Susan Solomon, Gordon Bonan, Scott Doney, Inez Fung, James Hack, Elizabeth Hunke, James Hurrell, John Kutzbach, Jerry Meehl, Bette Otto-Bliesner, R. Saravanan, Edwin K. Schneider, Lisa Sloan, Michael Spall, Karl Taylor, Joseph Tribbia & Warren Washington, 2001, "The Community Climate System Model", *Bulletin of the American Meteorological Society*, vol. 82, n°11, pp. 2357-2376.

Bodansky Daniel, 2001, "The history of the Climate change regime" **in** Lutherbacher U., Sprinz D.F. (Ed.), 2001, *International Relations and Global Climate Change*, Cambridge, MA, MIT Press, pp. 23-41.

Bolin Bert, B.R. Jäger & J. Döös, 1986, "1.2. Previous Assessments of the CO_2 problem", *SCOPE n°29*, "The Greenhouse Effect, Climatic Change, and Ecosystems", ICSU.

Bolin Bert & Eriksson Erik, 1958, "Changes in the Carbon Dioxide Content of the Atmosphere and Sea due to Fossil Fuel Combustion" **in** Bert Bolin (ed.), 1958, *The Atmosphere and the Sea in Motion: Scientific Contributions to the Rossby Memorial Volume*, New York, Rockefeller Institute Press, pp. 130-142.

Bojkov Rumen D., 2010, "The International Ozone Commission (IO3C). Its history and activities related to atmospheric ozone", Academy of Athens Research Centre for atmospheric physics and climatology, publication No 18, Athens, May 2010, 102 pages

Boltanski Luc & Ève Chiapello, 1999, *Le nouvel esprit du capitalisme*, Paris, Gallimard.

Bonneuil Christophe, 2006, « Cultures épistémiques et engagement public des chercheurs dans la controverse OGM », *Natures Sciences Sociétés, 14,* Dossier Engagement public des chercheurs, pp. 257-268.

Bonneuil Christophe & Jean-Baptiste Fressoz, 2013, *L'Événement Anthropocène. La Terre, l'histoire et nous*, Seuil, Collection « Anthropocène », 304 pages.

Bonneuil Christophe & Pierre-Benoît Joly, 2013, *Sciences, techniques et société*, La Découverte, Collection « Repères », « Sociologie », 128 pages.

Bonneuil Christophe, Céline Pessis & Sezin Topçu (dir.), 2013, *Une autre histoire des Trente Glorieuses. La France des années de croissance. 1945-1968*, La Découverte, 312 pages.

Bonner James, 1989, "Arie Haagen-Smit. A Biographical Memoir", *Biographical Memoirs of the National Academy of Sciences*, Vol. 58, National Academies Press, pp. 187-207.

Boudia Soraya & Nathalie Jas, 2007, "Introduction: Risk and 'Risk Society' in Historical Perspective", *History and Technology*, vol. 23, n°4 (December 2007), pp. 317-331

Bouleau Gabrielle, 2011, « Ambiguïtés du leadership européen sur l'environnement », article en libre accès (09/10/2012), http://hal.archives-

ouvertes.fr/docs/00/75/01/72/PDF/theorie-de-la-modernisation-A_cologique-manuscrit-AFSP-2011.pdf (04/09/2014)

Bourdeau Michel, 2009, « Agir sur la nature: la théorie positive de l'industrie », *Revue philosophique de la France et de l'étranger*, 2009/4 - Tome 134, pp. 439-456.

Brahic Catherine, 2009, "Earth's Plan B", *New Scientist*, 2009, n°2697 (28 February 2009), "Earth 2099. How to survive the century", p. 10.

Brasseur Guy, 2009, « Incidences du changement climatique sur la qualité de l'air », *Bulletin de l'OMM*, 58 (1) - Janvier 2009, pp. 10-15.

Brasseur Guy, 2008, Curriculum Vitæ, September 2008, http://www2.academieroyale.be/academie/documents/BRASSEUR20092677.pdf (05/09/2012), 33 pages

Brasseur Guy P., Prinn Ronald G., Psenny Alexander A.P. (Editors), 2003, *Atmospheric Chemistry in a Changing World – an integration and synthesis of a decade of tropospheric chemistry research*, Springer-Verlag, Berlin Heidelberg New York.

Brasseur Guy, Orlando John Joseph & Tyndall Geoffrey Stuart (Ed.), 1999, *Atmospheric Chemistry and the Global Change*, "a collective efforts of a group of scientists at the National Center for Atmospheric Research (NCAR) as well as other experts from several universities and national laboratories", Oxford University Press, 660 pages.

Braunstein J.-F., 2008, « les trois querelles de l'histoire des sciences », Braunstein (Ed.), 2008, *L'Histoire des Sciences. Méthodes, styles et controverses*, Vrin, pp. 87-103.

Bredekamp Horst, 2008, *Les coraux de Darwin. Premiers modèles évolutionnistes et tradition de l'histoire naturelle*, Les presses du réel « Œuvres en sociétés », 160 pages

Brewer Alan, 2009 (1999), "The Stratospheric Circulation: a Personal History" presented at 1999 Oxford "Brewer-Dobson Workshop" **in** Warwick Norton & Shuckburgh Emily, 2009, "Alan W. Brewer (1915-2007): the discovery of stratospheric dryiness", *The Eggs*, European Geosciences Union Newsletter, pp. 17-22.

Brewer A.W., C.T. McElroy & J.B. Kerr, 1973, "Nitrogen dioxide concentrations in the atmosphere", *Nature*, 246, pp. 129-133.

Bricker Owen P. & Rice Karen C., 1993, "Acid Rain", *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, Vol. 21, May 1993, pp. 151-174

Briday Régis, 2014, « Qui alimente les études sur la géoingénierie ? Une perspective d'historien des sciences », *Natures Sciences Sociétés*, Vol. 22, No. 2 (avril-juin 2014), « Vie de la recherche », pp. 124-131.

Brimblecombe Peter, 1987, *the Big Smoke – a history of air pollution in London since Medieval Times*, Edition Methuen, London.

Brimblecombe P. & C. Pfister, 1990, *The Silent Countdown. Essays in European Environmental History,* Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, New York, ISBN 3 540 51790 1.

Brimblecombe P. & C. Bowler, 1990, "Air pollution in York 1850–1900" **in** Brimblecombe P. & C. Pfister (Editors), 1990, pp. 182–195.

British National Committee for International Geophysical Year, 1957, *Guide to I.G.Y. : International Geophysical Year, 1957-8*, Foreword by Sir James Wordie, and contributions by members of the British Committee, London : Methuen.

Brown Wendy, 2007, *Les habits neufs de la politique mondiale. Néolibéralisme et néo-conservatisme*, Editions Les Prairies Ordinaires, Collection « Penser/croiser », Diffusion Les Belles Lettres, Paris, Novembre 2007, 140 pages.

Brüggemeier Franz-Josef, 1994, "A Nature Fit for Industry: The Environmental History of the Ruhr Basin, 1840 – 1990", *Environmental History review*, Vol. 18 No. 1, "Special Issue on Technology, Pollution, and the Environment" (Spring, 1994), pp. 35-54

Butler T.M. & Lawrence M.G., 2009, "The influence of megacities on global atmospheric chemistry: a modeling study", *Environ. Chem*, 6, pp. 219-225.

Cadle Richard D., 1962, "the photochemistry of the upper atmosphere of Jupiter", *Journal of Atmospheric Sciences*, Edited by the American Meteorological Society, 19(4), pp. 281-285.

Cadle Richard D., WH Fisher, ER Frank & JP Lodge, 1968, "Particles in the Antarctic Atmosphere", *Journal of Atmospheric Sciences*, Edited by the American Meteorological Society, 25(1), pp. 100-103.

Cadle Richard D., F.E. Grahek, B.W. Grandrud & A.L. Lazrus, 1973, "Relative Efficiencies of Filters and Impactors for Collecting Stratospheric Particulate Matter", *Journal of Atmospheric Sciences*, "Notes and Correspondence", May 1973, pp. 745-747.

Cairns T.L., J.P. Jesson, 1975, *The Ozone Question, Science,* « Letters », Vol. 190, No. 4219 (Dec. 12, 1975), pp. 1040-1043.

Callendar Guy Stewart, 1938, "The Artificial Production of Carbon Dioxide and Its Influence on Temperature", *Quarterly Journal Royal Meteorological Society*, vol. 64, pp. 223-240.

Callon Michel, Pierre Lascoumes & Yannick Barthe , 2001, Agir dans un monde incertain. Essai sur la démocratie technique, Paris, Le Seuil (collection "La couleur des idées"), 358 pages.

Camarero Mariam, Juana Castillo, Andrés J. Picazo-Tadeo & Tamarit Cecilio, 2013, "Eco-Efficiency and Convergence in OECD Countries", *Environ. Resource Econ.* (2013), 55, pp. 87–106

Cameron-Smith P., J.-F. Lamarque, P. Connell, C. Chuang, D. Rotman & J. Taylor, 2005, "Addition of Tropospheric Chemistry and Aerosols to the NCAR Community Climate

System Model", Report of the Lawrence Livermore National Laboratory, UCRL-TR-217228, November 21, 2005, 3 pages

Cameron-Smith P, J.-F. Lamarque, P. Connell, C. Chuang & F. Vitt, 2006, "Toward an Earth system model: atmospheric chemistry, coupling, and petascale computing", *Journal of Physics: Conference Series*, 46 (2006), Institute of Physics Publishing, doi:10.1088/1742-6596/46/1/048, pp. 343–350

Canan Penelope & Nancy Reichman, 1993, "Ozone Partnerships, the construction of regulatory communities, and the future of Global Regulatory Power", *Law & Policy*, Volume 15, Number 1, January 1993, article revised for publication after a paper presented at the symposium "Above the boundaries: Ozone Depletion, Equity and Climate Change" (annual meeting of the Law and Society Association in Philadelphia in May, 1992), pp. 61-74.

Cariolle Daniel, 1983, "The ozone budget in the stratosphere: results of a one-dimensional photochemical model", *Pher. Space Sci.*, Vol. 31, No. 9, pp. 1033-1052.

Cartwright Nancy, 1983, *How the Laws of Physics Lie*, Oxford University Press.

Calame Matthieu, 2011, *Lettre ouverte aux scientistes: Alternatives démocratiques à une idéologie cléricale*, Ed. Léopold Mayer, 160 pages.

Catling David, 2011, « Conway B. Leovy (1933–2011) », *Eos, Transactions, American Geophysical Union*, Vol. 92, No. 42, p. 363.

CES, 2012, "TIROS and Nimbus", Website of the "Centre for Ecological Sciences, Indian Institute of Science Bangalore, INDIA", « http://ces.iisc.ernet.in/hpg/envis/Remote/section144.htm (17/09/2012).

Chagnon Charles W. & Christian E. Junge, 1965, "The Size Distribution of Radioactive Aerosols in the Upper Troposphere", *J. Appl. Meteor.*, **4**, pp. 329–333

Chanin Marie-Lise (Dir.), 2008, *L'Ecole de l'Espace. Le service d'aéronomie, 1958-2008. Histoire et science*, CNRS Editions, 512 pages.

Chapman Sidney, 1964, *Solar Plasma, Geomagnetism, and Aurora*, Blackie and Son, London.

Chapman Sidney, 1934, "The gases of the atmosphere", *Presidential Address delivered before the Royal Meteorological Society on January 17, 1934*, pp. 133-135.

Chapman Sidney, 1931, "Bakerian Lecture. Some Phenomena of the Upper Atmosphere", *Proceedings of the Royal Society of London. Series A, Containing Papers of a Mathematical and Physical Character*, Published by: The Royal Society, Vol. 132, No. 820 (Aug. 1, 1931), pp. 353-374.

Chapman Sydney, 1930, "A Theory of Upper-Atmospheric Ozone", *Memoirs of the Royal Meteorological Society*, Vol. 3, n° 26, pp. 103-25.

Charvolin Florian, 2007, « L'environnementalisation et ses empreintes sémantiques en France au cours du XXème siècle », *Responsabilité & Environnement*, n°46, pp. 7-16.

Chevalier Amandine, 2007, *Développement du Service d'Observation PAES: Pollution atmosphérique à l'échelle synoptique, bilan de l'ozone dans la troposphère*, thèse de doctorat en « physique-chimie de l'atmosphère » à l'Université Toulouse III – Paul Sabatier, soutenue le 24 octobre 2007, http://tel.archives-ouvertes.fr/docs/00/19/37/44/PDF/MANUSCRIT_THESE_A_CHEVALIER.PDF (06/08/2014) 202 pages.

Christie Maureen, 2000, *The ozone layer – a philosophy of science perspective*, Cambridge University Press, 215 pages.

CIESIN (Center for International Earth Science Information Network), 1995, *Thematic Guide to Integrated Assessment Modeling of Climate Change* [online]. Palisades, NY: CIESIN. Available at http://sedac.ciesin.columbia.edu/mva/iamcc.tg/TGHP.html [accessed 08/01/2011].

Cicerone Ralph, 2006, "Geoengineering: encouraging research and overseeing implementation. *An Editorial Comment*", *Climatic Change* (2006) 77, pp. 221–226.

Cicerone R. J., Scott Elliott & R.P. Turco, 1991, "Reduced Antarctic Ozone Depletions in a Model with Hydrocarbon Injections", *Science*, New Series, Vol. 254, No. 5035 (Nov. 22, 1991), pp. 1191-1194.

Cicerone Ralph J., Richard S. Stolarski & Stacy Walters, 1974, "Stratospheric Ozone Destruction by Man-Made Chlorofluoromethanes", *Science*, New Series, Vol. 185, No. 4157 (Sep. 27, 1974), pp. 1165-1167

Clapp B.W., 1994, *An Environmental History of Britain since the Industrial Revolution*, Longman, London and New York.

Clark Ian, 1974, "Expert advice in the controversy about supersonic transport in the United States", *Minerva*, Volume 12, Number 4 (1974), Pages 416-432.

Clark William C., Paul J. Crutzen & Hans J. Schellnhuber , 2004, "Chapter 1. Science for Global Sustainability: Toward a New Paradigm" **in** Schellnhuber *et al.* (Ed.), 2004, pp. 1-28.

Cloud John, 2003, "Introduction: Special Guest-Edited Issue on the Earth Sciences in the Cold War, *Social Studies of Science*, Vol. 33, No. 5, "Special Issue: Earth Sciences in the Cold War (Oct., 2003, pp. 629-633.

Cobb William, 1968, "The Atmospheric Electric Climate at Mauna Loa Observatory, Hawaii", *Journal of Atmospheric Sciences*, Edited by the American Meteorological Society, 25, pp. 470-480.

Cohen Ronald, 1998, "Citation" of RONALD COHEN's speech for the 1998 Roger Revelle Medal Winner's Ceremony in honor of Harold Jonhston, http://sites.agu.org/honors/winners/harold-s-johnston/?sub=citation (15/08/212)

Collins William D., Cecilia M. Bitz, Maurice L. Blackmon, Gordon B. Bonan, Christopher S. Bretherton, James A. Carton, Ping Chang, Scott C. Doney, James J. Hack, Thomas B. Henderson, Jeffrey T. Kiehl, William G. Large, Daniel S. McKenna, Benjamin D. Santer & Richard D. Smith, 2006, "The Community Climate System Model Version 3 (CCSM3)", *Journal of Climate*, Vol. 19, pp. 2122-2143.

Collins H.M. & Evans R.J., 2002, "The Third Wave of Science Studies: Studies of Expertise and Experience", *Social Studies of Sciences*, Vol. 32, No. 2, (April), pp. 235–296.

Comeliau Christian (Dir.), 2013, *Développement durable et responsabilité citoyenne*, Privat, Toulouse.

Conway Erik, 2011, "Infrastructures of Earth and Sky", *Historical Studies in the Natural Sciences,* "Book Review", Vol. 41, Number 3, pp. 344-353.

Conway Erik, 2009, "The history of atmospheric science at NASA", NASA History Division, "News & Notes", Vol. 26, n°1, http://history.nasa.gov/nltr26-1.pdf, 23 pages

Conway Erik, 2008, *Atmospheric Science at NASA: a history*, Johns Hopkins University Press.

Conway Erik, 2005, *High-Speed Dreams: NASA and the Technopolitics of Supersonic Transportation, 1945-1999,* Baltimore: Johns Hopkins University Press.

Corbin Alain, 1986 (1982), *le Miasme et la Jonquille. L'odorat et l'imaginaire social, XVIII^e-XIX^e siècles*, Flammarion, coll. « Champs », Paris, 342 pages.

Courteix Simone, 1972, « La coopération américano-soviétique dans le domaine de l'exploration et de l'utilisation pacifique de l'espace extra-atmosphérique. In: Annuaire français de droit international », volume 18, 1972, pp. 731-751.

Cousteau Jacques, 1977, "Jacques Cousteau at NASA Headquarters", Interview by Stewart Brand **in** Stewart Brand (Ed.), 1977, *Space Colonies*, Journal, ACO Evolution Book, Published by the Whole Earth Catalog, pp. 98-103.

Crist Eileen & H. Bruce Rinker (Ed.), 2010, *Gaia in Turmoil: Climate Change, Biodepletion, and Earth Ethics in an Age of Crisis*, foreword by Bill McKibben, The MIT Press..

Cronon William C., 1983, *Changes in the land: Indians, colonists, and the ecology of New England*, Hill and Wang, New York, 241 pages

Cronon William, 1991, *Nature's metropolis: Chicago and the Great West*, Norton, 530 pages.

Crubelier Michel & Pellegrin Pierre, 2002, *Aristote – le philosophe et ses savoirs*, Paris, Seuil, Coll. *Points « Essais »*, 432 pages.

Cruikshank Dale P. & Joseph W. Chamberlain, 1999, "The Beginnings of the Division for Planetary Sciences of the American Astronomical Society", *The American Astronomical Society's first century* volume edited by David H. DeVorkin, pp. 252-268.

Crutzen Paul, 2010, "PUBLICATION LIST Prof. Dr. Paul J. Crutzen" & "Curriculum Vitae", www.atmosphere.mpg.de/files/.../PublCru.pdf (03/11/2010)

Crutzen Paul J., 2006, "Albedo enhancement by stratospheric sulfur injections: A contribution to resolve a policy dilemma?", *Climatic Change*, 77 (3–4), pp. 211–219.

Crutzen Paul J., 2002, "Geology of mankind", *Nature*, vol. 415, 3 janv. 2002, p. 23.

Crutzen Paul J., 1995, "My life with O_3, NO_x and other YZO_Xs", Nobel Lecture, December 8, 1995, http://www.nobelprize.org/nobel_prizes/chemistry/laureates/1995/crutzen-lecture.pdf (05/05/2012)

Crutzen P.J., 1974, "A Review of Upper Atmospheric Photochemistry", *Canadian Journal of Chemistry*, 52 (1974), p. 1569.

Crutzen, P.J., 1972, « SST's - a threat to the earth's ozone shield », *Ambio*, **1**, pp. 41-51.

Crutzen Paul J., 1971, "Ozone production rates in an oxygen-hydrogen-nitrogen oxide atmosphere", *Journal of Geophysical Research*, 76, October 1971, Vol. 30, n° 7311, pp. 1490-1497.

Crutzen Paul J., 1970, "The influence of nitrogen oxides on the atmospheric ozone content", *Q. J. Roy. Meteor. Soc.*, 96, pp. 320-325.

Crutzen Paul J., 1969, "Determination of parameters appearing in the "dry" and the "wet" photochemical theories for ozone in the stratosphere", *Tellus XXI (1969), 3*, pp. 368-388.

Crutzen P. & J. Birks, 1982, "The atmosphere after a nuclear war: Twilight at noon," *Ambio*, 11, no. 2–3 (June 1982), pp. 114-125.

Crutzen Paul & Dieter H. Ehhalt, 1983, *Journal of Atmospheric Chemistry*, n°1, "Editorial of the Editors", pp. 1-2.

Crutzen Paul & Georgy S. Golitsyn, 1992, "Linkages between Global Warming, Ozone Depletion, Acid Depletion, Acid Deposition and Other Aspects of Global Environmental Change" **in** Mintzer Irving (Ed.), 1992, *Confronting Climate Change – Risks, Implications and Responses*, pp. 15-32

Crutzen Paul & Will Steffen, 2003, "How long have we been in the Anthropocene era?", *Climatic Change*, 61, pp. 251-257

Crutzen Paul J. & Eugene F. Stoermer, 2000, "The Anthropocene", *Global Change Newsletter*, 41, *IGBP*, pp. 17-18.

Crutzen Paul & Ramanathan Veerabhadran, 2004, "Chapter 14. Atmospheric Chemistry and Climate in the Anthropocene: Where are we heading?" **in** Schellnhuber *et al.* (Ed.), 2004, pp. 265-292

Dahan Amy, 2010, "Putting the Earth System in a numerical box? The evolution from climate modeling toward global change", *Studies in History and Philosophy of Modern Physics*, 41 (2010), pp. 282–292.

Dahan-Dalmedico Amy (Dir.), 2007**,** *Les modèles du futur. Changement climatique et scénarios économiques : enjeux scientifiques et politiques*, La Découverte, Paris

Dahan-Dalmedico Amy, 2007, « Le régime climatique, entre science, expertise et politique » **in** Dahan-Dalmedico (dir.), 2007, pp. 113-139

Dahan Amy, Michel Armatte, Christophe Buffet & Aurore Viard-Crétat, 2012, « Plateforme de Durban: Quelle crédibilité accorder encore au processus des négociations climatiques ? », *Koyré Climate Series n°4*, Rapport de Recherche, en ligne sur le Site du Centre Alexandre Koyré, Mars 2012, 40 pages.

Dahan Amy, Stefan Aykut, Christophe Buffet & Aurore Viard-Crétat, 2010, « Les Leçons politiques de Copenhague: Faut-il repenser le régime climatique ? », *Koyré Climate Series n°2*, Rapport de Recherche, en ligne sur le Site du Centre Alexandre Koyré, Février 2010, 48 pages.

Dahan Amy, Stefan Aykut, Hélène Guillemot, Agatha Korczak, 2009, « Les arènes climatiques : forums du futur ou foires aux palabres ? La Conférence de Poznan », *Koyré Climate Series n°1*, Rapport de Recherche, en ligne sur le Site du Centre Alexandre Koyré, Février 2009, 45 pages.

Dahan Amy, Christophe Buffet & Aurore Viard-Crétat, 2011, « Le Compromis de Cancun: Vertu du pragmatisme ou masque de l'immobilisme ? », *Koyré Climate Series n°3*, Rapport de Recherche, en ligne sur le Site du Centre Alexandre Koyré, Février 2011, 40 pages.

Dahan Amy & Pestre Dominique (Dir.), 2004, *Les sciences pour la guerre. 1940-1960*, Ed. de l'EHESS, Paris, 404 pages.

Daniel John S., Solomon Susan, Sanford Todd J., McFarland Mack, Fuglestvedt Jan S. & Friedlingstein Pierre, 2012, "Limitations of single-basket trading: lessons from the Montreal Protocol for climate Policy", *Climatic Change* (2012), 111, pp. 241–248

Dardot Pierre & Laval Christian, 2009, *La nouvelle raison du monde. Essai sur la société néolibérale*, La Découverte, 498 pages.

Daston Lorraine & Galison Peter, 2007, *Objectivity*, New York, Zone Books, 502 pages.

Daston Lorraine & Sibum Otto H., 2003, "Introduction : Scientific Personae and Their Histories", *Science in Context*, 16(1/2), Cambridge University Press, pp. 1-8.

Debeir Jean-Claude, Jean-Paul Deléage & Daniel Hémery , 1986, *Les servitudes de la puissance. Une histoire de l'énergie*, Flammarion, Collection « Nouvelle bibliothèque scientifique », Paris, 428 pages.

Deléage Jean-Paul, 1992, *Histoire de l'écologie : Une science de l'homme et de la nature*, Paris, Éditions La Découverte.

Delmas Corinne, 2011, *Sociologie politique de l'expertise*, La Découverte, Coll. Repères, 128 pages.

Dennis Michael A., 1999, "Secrecy and Science Revisited: From Politics to Historical Practice and Back" **in** Judith Reppy (ed.), 1999, *Secrecy and Knowledge Production*, Cornell University, Ithaca, NY, "Peace Studies Program", pp. 1-16.

DeVorkin David H., 1992, *Science with a Vengeance: How the Military Created the U.S. Space Sciences after World War II*, Springer-Verlag, New York.

DeVorkin David H., 1989, *Race to the Stratosphere – manned scientific ballooning in America*, Springer-Verlag, 406 pages.

Dewey Scott H., 1998, "Part Cause, Part Cure: the Changing Relationship between Aviation and Air Pollution in the United States, 1927-1973", *1998 National Aerospace Conference Proceedings*, pp. 344-354

Dignon Jane & Hameed Sultan, 1985, "A Model Investigation of the Impact of Increases in Anthropogenic NOx Emissions Between 1967 and 1980 on Tropospheric Ozone", *Journal of Atmospheric* Chemistry, 3 (1985), pp. 491-506.

Dilling Lisa & Rachel Hauser, 2013, "Governing geoengineering research: why, when and how?", *Climatic Change*, December 2013, Volume 121, Issue 3, pp. 553-565.

Dlugokencky Ed, John Miller & Johannes Staehelin, 2010, "The Global Atmosphere Watch: a history of contributing to climate monitoring", *Bulletin of The journal of the World Meteorological Organization*, Volume 59 (1), January 2010, pp. 35-39

Dobben W. H. (van) & Lowe-McConnell R. H. (Ed.), 1975, *Unifying Concepts in Ecology*, Report of the plenary sessions of the First international congress of ecology, The Hague, the Netherlands, September 8–1 1974, The Hague and Centre for agricultural publishing and documentation, Wageningen, 302 pages.

Dobson Gordon M.B., 1968, "40 Years Research on Atmospheric Ozone at Oxford - A History", *Applied Optics*, 7 (3), pp. 387–405.

Doel Ronald, 2009, « Quelle place pour les sciences de l'environnement physique dans l'histoire environnementale ? », *Revue d'histoire moderne et contemporaine*, 2009: 56/4, numéro spécial « Histoire de l'environnement », oct.-déc. 2009, pp. 137-164.

Doel Ronald, 2003, "Constituting the Postwar Earth Sciences: The Military's Influence on the Environmental Sciences in the USA after 1945", *Social Studies of Science*, 33/2, pp. 635–666.

Doel Ronald & Kristine C. Harper, 2006, "Prometheus Unleashed: Science as a Diplomatic Weapon in the Lyndon B. Johnson Administration", *Osiris* 2nd Series, Vol. 21, pp. 66-85

Doel Ronald E. & Thomas Söderqvist, 2006, *The historiography of contemporary science, technology, and medicine: writing recent science*, Routledge, London, 336 pages

Dörries Matthias, 2011, "The Politics of Atmospheric Sciences: "Nuclear Winter" and Global Climate Change", *Osiris*, Vol. 26, No. 1: "Klima" (2011), pp. 198-223.

Dörries Matthias, 2006, "In the public eye: Volcanology and climate change studies in the 20th century", *Historical Studies in the Physical and Biological Sciences, 37* (2006), pp. 87-125.

Dotto Lydia & Schiff Harold, 1978, *the Ozone War*, Garden City, New York: Doubleday, 342 pages.

Drennen Thomas E., 1993, "After Rio: Measuring the effectiveness of the International Response", *Law & Policy*, Volume 15, Number 1, January 1993, article revised for publication after a paper presented at the symposium "Above the boundaries: Ozone Depletion, Equity and Climate Change" (annual meeting of the Law and Society Association in Philadelphia in May, 1992), pp. 15-37.

Drouin Jean-Marc, 1991, *Réinventer la nature : L'écologie et son histoire*, Paris, Desclée de Brouwer.

Druffel Ann, 2003, *Firestorm: Dr. James E. McDonald's Fight for UFO Science*. Wild Flower Press, 609 pages.

Dupuy Jean-Pierre, 2002, *Pour un catastrophisme éclairé*, Paris : Seuil, 216 pages

Dyson Freeman, 1984, *Weapons and Hope*, Harper & Row Publishers, 344 pages

Ecologist (the), 1972, *A Blueprint for Survival*, "Special Issue", Vol. 2, No. 1, January 1972

Edwards Paul N., 2012, "Entangled histories: Climate science and nuclear weapons research", *Bulletin of the Atomic Scientists*, 68(4), pp. 28-40.

Edwards Paul N., 2010, *A Vast Machine. Computer Models, Climate Data, and the Politics of Global Warming*, the MIT Press, 220 pages.

Edwards Paul N., 2006, "Meteorology as Infrastructural Globalism" **in** John Krige and Kai-Henrik Barth (Eds), *Global Power Knowledge: Science and Technology in International Affairs: Historical Perspectives, Osiris* 21(2006), pp. 229-250

Edwards Paul N., 2004, « Construire le monde clos : l'ordinateur, la bombe et le discours politique de la guerre froide » **in** Dahan Amy & Pestre Dominique (Dir.), 2004, *Les*

sciences pour la guerre (1940-1960), Paris, Éditions de l'École des hautes études en sciences sociales, pp. 195-221.

Edwards Paul N., 2001, "Representing the Global Atmosphere: Computer Models, Data, and Knowledge about Climate Change" **in** Clark Miller and Paul N. Edwards (Eds), 2001, *Changing the Atmosphere: Expert Knowledge and Environmental Governance,* Cambridge, MA: MIT Press, pp. 31-66.

Edwards Paul N., 1996, *The Closed World: Computers and the Politics of Discourse in Cold War America*, MIT Press, Cambridge.

Edwards Paul N. & Stephen H. Schneider, 1997, "The 1995 IPCC Report: Broad Consensus or 'Scientific Cleansing'?", *Ecofables/Ecoscience*, 1:1 (1997), pp. 3-9

Ehhalt Dieter, 1974, *Vertical profiles of HTO, HDO and H2O in the troposphere*, NCAR technical note, Atmospheric Quality and Modification Division, NCAR-TN/STR-100, November 1974, Boulder, Colorado, 10 pages.

Ekholm Nils, 1901, "On the Variations of the Climate of the Geological and Historical Past and Their Causes", *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, vol. 27, pp. 1-61.

EPA (Site Internet de l'US EPA), 2014 (1980), "Summary of 1980 Budget", http://www2.epa.gov/planandbudget/archive (02/04/2004).

Eriksson Erik, 1998, "Interview with Erik Eriksson" by H. Taba, during *The international symposium, Rossby 100,* held in Stockholm, Sweden, 8-12 June 1998, to commemorate the 100th anniversary of the birth of Prof. Carl-Gustaf Rossby, on line on WMO website,
http://www.wmo.int/pages/publications/bulletin_en/interviews/eriksson_en.html #Phillips (05/09/2014)

ETC Group, 2010, "Geopiracy: The Case Against Geoengineering", ETC Group Communiqué # 103, First published October 2010, Second edition November 2010, http://www.etcgroup.org/upload/publication/pdf_file/ETC_geopiracy_4web.pdf (le 05/03/2012), 53 pages.

European Commission (website of), 2004, *Assessment of the Effectiveness of European Air Quality Policies and Measures*, A project for DG Environment carried out by Milieu Ltd, the Danish National Environmental Research Institute, and the Center for Clean Air Policy, "Case Study 2. Comparison of the EU and US Air quality standards & Planning requirements, 4 October 2004,
http://ec.europa.eu/environment/archives/cafe/activities/pdf/case_study2.pdf (05/08/2014).

European Space Agency's website, 2010, "Wexler Wexler: Father of weather satellites", http://www.esa.int/SPECIALS/ESAhistory/SEM68SEVL2F_0.html (le 04/01/2012)

Eyler John M., 1980, "The conversion of Angus Smith: the Changing role of Chemistry and Biology in Sanitary Science, 1850-1880", *Bulletin of the History of Medecine*, Vol. 54, Summer 1980, pp. 216-234.

Eyring V., J.-F. Lamarque, P. Hess, F. Arfeuille, K. Bowman, M. P. Chipperfield, B. Duncan, A. Fiore, A. Gettelman, M. A. Giorgetta, C. Granier, M. Hegglin, D. Kinnison, M. Kunze, U. Langematz, B. Luo, R. Martin, K. Matthes, P. A. Newman, T. Peter, A. Robock, T. Ryerson, A. Saiz-Lopez, R. Salawitch, M. Schultz, T. G. Shepherd, D. Shindell, J. Stähelin, S. Tegtmeier, L. Thomason, S. Tilmes, J.-P. Vernier, D. W. Waugh, & P. J. Young, 2013, "Overview of IGAC/ SPARC Chemistry-Climate Model Initiative (CCMI) Community Simulations in Support of Upcoming Ozone and Climate Assessments", *SPARC Newsletter*, n° 40, pp. 48-66

Fahey D.W. (Lead Author), 2007, *Twenty Questions and Answers About the Ozone Layer: 2006 Update*, 50 pp., World Meteorological Organization, Geneva, 2007. [Reprinted from *Scientific Assessment of Ozone Depletion: 2006*, Global Ozone Research and Monitoring Project - Report No. 50, 572 pages; World Meteorological Organization, Geneva, 2007.]

Farman Joseph, 1994, « L'ozone dans l'atmosphère. Trop peu et trop », *Etudes*, Tome 381, n°5 (3915), novembre 1994, Paris, pp. 481-492.

Farman Joseph C., B.G. Gardiner & J.D. Shanklin, 1985, "Large losses of total ozone in Antarctica reveal seasonal ClO_x/NO_x interaction", *Nature*, Vol. 315, May 1985, "Letters to Nature", pp. 207-210.

Farman Joseph C. & Richard A. Hamilton, 1975, *Measurements of atmospheric ozone at the Argentine Islands and Halley Bay, 1957-72,* Cambridge: British Antarctic Survey.

Fatoux François, 2008, « Les référentiels et les grandes normes internationales dans le domaine du développement durable », *Responsabilité & Environnement, n°50 (avril 2008)*, pp. 60-65.

Fenn M.E, L.I. de Bauer, A. Quevedo-Nolasco & C. Rodriguez-Frausto, 1999, "Nitrogen and sulfur deposition and forest nutrient status in the Valley of Mexico", *Water, Air, and Soil Pollution*, 113, pp. 155–174.

Finlayson-Pitts, Barbara J. & Pitts, James N., 1986, *Atmospheric chemistry : fundamentals and experimental techniques*, "chapter 15: Interactions Between Tropospheric and Stratospheric Chemistry", Editeur: Wiley, c1986, 1011-1029.

Fisher B.E.A., 1975, "The Long Range Transport of Sulphur Dioxide", *Atmospheric Environment*, 9 (1975), pp. 1063-1070.

Fleagle Robert G., 1986, "NOAA's Role and the National Interest", *Science, Technology, & Human Values*, Vol. 11, No. 2 (Spring, 1986), pp. 51-62.

Fleming James Rodger, 2010, *Fixing the Sky: The Checkered History of Weather and Climate Control*, Columbia University Press, 344 pages.

Fleming James R., 2007 (a), "The Climate Engineers. Playing God to Save the Planet", *The Wilson Quarterly*, Spring 2007, pp. 46-60.

Fleming James R., 2007 (b), ""On the Possibilities of Climate Control" in 1962: Harry Wexler on Geoengineering and Ozone Destruction", Paper for the American Geophysical Union, Dec. 14, 2007, documents on line, http://www.colby.edu/sts/wexlerozone.pdf & http://www.colby.edu/sts/agu2007wexler.doc (le 10/06/2011)

Fleming James R., 2007 (c), *The Callendar effect: the life and times of Guy Stewart Callendar (1898-1964), the scientist who established the carbon dioxide theory of climate change*, American Meteorological Society, 155 pages.

Fleming James Rodger, 2006, "The pathological history of weather and climate modification: Three cycles of promise and hype", *Historical Studies in the Physical and Biological Sciences*, Vol. 37, No. 1 (September 2006), pp. 3-25.

Fleming James R. (editor), 2004-2009, *History of Meteorology*, vols. 1-5 (2004-06), ISSN 1555-5763, http://www.meteohistory.org/

Fleming, James R., 1990, *Meteorology in America, 1800-1870.* Baltimore: Johns Hopkins University Press.

Forman Paul, 1987, "Behind quantum electronics: national security as basis for physical research in the United States, 1940-1960", *Historical Studies in the Physical Sciences*, 18-1, pp. 149-229.

Foucault Michel, 1989 (1977-1982), *Résumé des cours au Collège de France, 1970-1982*, Julliard.

Foucault Michel, 2004, Sécurité, territoire, population. Cours au Collège de France (1977-78), Paris : Gallimard/Seuil (Collection « Hautes Études »), 435 pages.

Fressoz Jean-Baptiste, 2012, *L'apocalypse joyeuse. Une histoire du risque technologique*, Éditions du Seuil (L'univers historique).

Fressoz Jean-Baptiste, 2009, « Circonvenir les circumfusa. La chimie, l'hygiénisme et la libéralisation des «choses environnantes»: France, 1750-1850 », *Revue d'histoire moderne et contemporaine*, 2009: 56/4, numéro spécial « Histoire de l'environnement », oct.-déc. 2009, pp. 39-76.

Fressoz Jean-Baptiste & Fabien Locher, 2010, « Le climat fragile de la modernité. Petite histoire climatique de la réflexivité environnementale », *la vie des idées*, http://www.laviedesidees.fr/Le-climat-fragile-de-la-modernite.html [20/04/2010], 15 pages.

Frioux Stéphane & Vincent Lemire, 2012, « Pour une histoire politique de l'environnement au 20ème siècle », *Vingtième Siècle. Revue d'histoire*, n°113 (janvier-mars 2012), pp. 3-12.

Funtowicz S.O. & Jerome R. Ravetz, 1991, "A New Scientific Methodology for Global Environmental Issues" **in** Robert Costanza (Ed.), 1991, *Ecological Economics: The Science and Management of Sustainability*, Columbia University Press, New York, pp. 137–152.

Galison Peter, 2008, "Ten Problems in History and Philosophy of Science", *Isis*, 99, pp. 111–124

Galison Peter, 1997, *Image & Logic – a material culture of microphysics*, the University of Chicago Press, 955 pages.

Galison Peter & Alex Roland (Eds), 2000, "Atmospheric Flight in the Twentieth Century", *Archimedes. New Studies in the History and Philosophy of Science and Technology*, Volume 3, Springer Science & Business Media Dordrecht, 385 pages.

Galison Peter and Bruce Hevly (eds), 1992, *Big Science: The Growth of Large-Scale Research*, Stanford University Press.

Galison P. & Assmus A., 1989, « Artificial clouds, real particles », **in** *The Uses of experiment – Studies in the natural sciences*, Cambridge University Press, 1989, Edited by David Gooding, Trevor Pinch, Simon Schaffer, pp. 224-274.

Gallet Bastien, 2011, « La théorie des sphères de Peter Sloterdijk », http://www.musicafalsa.com/imprimer.php3?id_article=69 (09/09/2011)

Galloway J.N., G.E. Likens & E.S. Edgerton, 1976, "Acid precipitation in the Northeastern United States: pH and Acidity", *Science*, 194, pp. 722-724

Garfield Eugene, 1992, "NAS Award for Scientific Reviewing of Stratospheric Ozone Dynamics", Essays of an Information Scientist: Of Nobel Class, Women in Science, Citation Classics, and other Essays, Vol 15, 1992-93, #17, April 27, 1992, pp. 57-62

Garnier Emmanuel, 2010, « Fausse science ou nouvelle frontière ? Le climat dans son histoire », *Revue d'histoire moderne et contemporaine*, 2010/3, n° 57-3, pp. 7-41

Geels Frank W. & Bruno Turnheim, 2010 (a), "The destabilisation of existing regimes in socio-technical transitions: A multi-dimensional framework and case study of the British coal industry (1880-1970)", Paper for NickFest, 29-30 March 2010, University of Sussex.

Geels Frank W. & Bruno Turnheim, 2010 (b), "The destabilisation of existing regimes in socio-technical transitions: A multi-dimensional framework and case study of the British coal industry (1913-1970)", http://nickfest.freeman-centre.ac.uk/conference-program/b-turnheim-f-geels.pdf (20/10/2013).

George Pierre, 1975, *Guy Jalabert, Les Industries aéronautiques et spatiales en France*, Annales de Géographie, Année 1975, Volume 84, Numéro 461, pp. 113 - 116

Gibbons M., C. Limoges, H. Nowotny, S. Schwartzman, P. Scott & M. Trow, 1994, *The New Production of Knowledge: The Dynamics of Science and Research in Contemporary Societies*, SAGE, London.

Gillings Michael R. & Elizabeth L. Hagan-Lawson, 2014, "The cost of living in the Anthropocene", *Earth Perspectives*, 2014, 1:2, 11 pages.

Goodhart Philip, 1974, « La défense de l'Europe et la coopération franco-britannique », *Politique étrangère*, N°2, 1974, 39ème année, pp. 215-222.

Goody Richard, 2002, "Observing and thinking about the atmosphere", *Annual Review of Energy and the Environment*, 27 (2002), pp. 1-20.

Goody Richard, 2000, "An early view of Earth and planetary atmospheres", *Planetary and Space Science*, 48 (2000), pp. 351-356.

Goody Richard, 1999 (1996), "Observing the Earth: A Frankenstein Dilemna", "the original transcript of a talk on the Earth Observing System given by Professor RM Goody the Harvard Shop Club on December 19, 1996, *Earth. Obs. Rem. Sens.*, Vol. 15, pp. 635-643.

Goody Richard, 1998, en réponse à son obtention de la 'William Bowie Medal' lors de l'AGU (American Geophysical Union) Spring Meeting Honors Ceremony, Site officiel de l'AGU, http://www.agu.org/about/honors/union/bowie/goody_richardm.shtml (20/03/2011)

Goody Richard, 1969, "Time variations in atmospheric N_2O in Eastern Massachusetts", *Planetary and Space Science*, Volume 17, Issue 6, June 1969, pp. 1319-1320.

Goody Richard M., 1954, *The Physics of the Stratosphere*, Cambridge at the University Press, 187 pages.

Goody Richard M., 1949, "The thermal equilibrium at the tropopause and the temperature of the lower stratosphere", *Proc. R. Soc. A.* 197, pp. 487–505

Goody R. & C.D. Walshaw, 1953, "The origin of atmospheric nitrous oxide", *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society,* Vol. 79, issue 342, pp. 496-500.

Gorham Eville, 1998, "Acid deposition and its ecological effects: a brief history of research", *Environmental Science & Policy*, Volume 1, Number 3, August 1998, pp. 153-166.

Gorham Eville, 1991, "Biogeochemistry: its origins and development", *Biogeochemistry*, 13, pp. 199-239.

Grevsmuehl Sebastian, 2014 (à paraître), "A Hole in the Sky? A Visual History of Atmospheric "Hole-Making": From Astronomical Windows over Geophysical Warfare to the Antarctic Ozone Hole", communication personnelle, parution probable dans Blum Scout (Dir.), 2014 (?), *Looking Up ! An Environmental History of the Sky*, North Carolina Press), communication personnelle, 23 pages

Grevsmuehl Sebastian, 2012, *A la Recherche de l'Environnement Global: De l'Antarctique à l'Espace et Retour. Instrumentations, images, discours et métaphores*, mémoire de thèse pour l'obtention du titre de docteur en sciences sociales à l'EHESS (direction : Amy Dahan ; soutenance le 12 décembre 2012), Spécialité « Histoire des sciences et des techniques », 460 pages.

Grundmann Reiner, 2006, "Ozone and Climate: Scientific Consensus and Leadership", *Science, Technology & Human Values*, 31 (1), pp. 73-101.

Grundmann Reiner, 2002, "Transnational Environmental Policy. Reconstructing Ozone" **in** Biermann Frank, Rainer Brohm & Klaus Dingwerth (Ed.), 2002, *Proceedings of the 2001 Berlin Conference on the Human Dimensions of Global Environmental Change "Global Environmental Change and the Nation State"*, London : Routledge, pp. 405-414.

Guillemot Hélène & Stefan Aykut, 2013, « Trois débats sur le climat », *La Recherche*, 478 (2013), pp. 73-79.

Guillemot Hélène, 2010, "Connections between simulations and observation in climate computer modeling. Scientist's practices and ''bottom-up epistemology'' lessons", *Studies in History and Philosophy of Modern Physics*, 41 (2010), pp. 242–252.

Guillemot Hélène, 2007 (a), *La modélisation du climat en France des années 1970 aux années 2000. Histoire, pratiques, enjeux politiques*, thèse soutenue en décembre 2007, sous la direction d'Amy Dahan (Centre Alexandre Koyré), EHESS, Paris.

Guillemot Hélène, 2007 (b), « Les modèles numériques du climat » **in** Dahan-Dalmedico (Dir.), 2007, pp. 93-112.

Gurjar B.R., T.M. Butler, M.G. Lawrence & J. Lelieveld, 2008, "Evaluation of emissions and air quality in megacities", *Atmospheric Environment*, Volume 42, Issue 7, March 2008, pp. 1593-1606.

Gwynne M.D., 1988, "The global environment monitoring system (GEMS): Some recent developments"**,** *Environmental monitoring and assessment*, 11 (1988), pp. 219-223

Haas Peter M., 1992 (1), "Introduction: Epistemic communities and International Policy Coordination", *International Organization*, Vol. 46, No. 1, "Knowledge, Power, and International Policy Coordination" (Winter, 1992), pp. 1-35.

Haas Peter M., 1992 (2), "Banning Chlorofluorocarbons: Epistemic Community Efforts to Protect Stratospheric Ozone", *International Organization*, Vol. 46, No. 1, "Knowledge, Power, and International Policy Coordination" (Winter, 1992), pp. 187-224.

Haas Peter M. & David McCabe, 2001, "Amplifiers or dampeners: international institutions and social learning in the management of global environmental risks" **in**

Clark William (Ed.), 2001, *Learning to Manage Global Environmental Risks*, Vol. 1, MIT Press, Cambridge (MA), pp. 323-348.

Hackett Edward J., Olga Amsterdamska & Michael Lynch (Ed.), 2007, *The Handbook of Science and Technology Studies*, MIT Press, 1080 pages.

Hamilton Clive, 2013, *les Apprentis sorciers du climat. Raisons et déraisons de la géo-ingénierie*, Ed. Seuil, Collection Anthropocène, traduction de l'anglais de *Earthmasters. The dawn of the Age of Climate Engineering* (Yale University Press), 352 pages.

Hamlin Christopher, 2004, "Smith, (Robert) Angus (1817–1884)", *Oxford Dictionary of National Biography*, Oxford University Press.

Hampson J., 1964, "Photochemical Behavior of the Ozone Layer", Technical Note 1627/64, Canadian Armaments Research and Development Establishment, Valcartier, Quebec, p. 280.

Hansen James, Kharecha Pushker & Sato Makiko, 2013, "Climate forcing growth rates: doubling down on our Faustian bargain", *Environ. Res. Lett.*, 8 (2013), "Perspective", IP Address: 82.120.167.168 This content was downloaded on 24/01/2014 at 09:18, 9 pages.

Hansen James, 2009, *Storms of My Grandchildren: The Truth About the Coming Climate Catastrophe and Our Last Chance to Save Humanity*, New York: Bloomsbury, 304 pages

Hansen J.E. & A.A. Lacis, 1990, "Sun and dust versus greenhouse gases: An assessment of their relative roles in global climate change", *Nature*, 346, "article review", pp. 713-719.

Hardaker Paul, 2011, "Obituary: Professor Richard Scorer, Hon FRMetS", Volume 66, Issue 11, November 2011, p. 311.

Hare Kenneth F., 1962, "the Stratosphere", *Geographical Review*, Vol. 52, No. 4 (Oct., 1962), pp. 525-547.

Harper Kristine C., 2008, *Weather by the Numbers: the genesis of modern meteorology*, MIT Press, 308 pages.

Harremoës Poul, David Gee, Malcolm MacGarvin, Andy Stirling, Jane Keys & Sofia Guedes Vaz (Editors), 2001, "Late lessons from early warnings: the precautionary principle 1896–2000", *Environmental issue report, n° 22*, European Environment Agency, 211 pages.

Harrison Halstead, 2008, « Vita » & « publications » on line, site de l'Université de Washington (Seattle), http://www.atmos.washington.edu/~harrison/hh.htm & http://www.atmos.washington.edu/%7eharrison/hhpaprs.pdf (le 08/08/2012)

Harrison Halstead, 2003, "Boeing Adventures, with Digressions", Autobiographical paper by Halstead Harrison, March 5, 2003,

http://www.atmos.washington.edu/~harrison/reports/b2707.pdf (le 09/09/2011), 28 pages.

Harrison Halstead, 1970, "Stratospheric Ozone with Added Water Vapor: Influence of High-Altitude Aircraft", *Science*, 170 (1970), pp. 734-736.

Harrison Halstead, Scattergood D.M. & Shupe M.R. (Geo-Astrophysics Laboratory, Boeing Scientific Research Laboratories, Seattle, Washington 98124, U.S.A.), 1968, "the condensation and sublimation of CO_2 with H_2O: carbonic acid on Mars?", *Planet. Space Sci.*, 1968, Vol. 16. pp. 495-499.

Hart David M. & David G. Victor, 1993, "Scientific Elites and the Making of US Policy for Climate Change Research. 1957-1974", *Social Studies of Science*, 23, pp. 643-680

Hauglustaine Didier, 2004, « Modélisation globale de l'évolution de l'ozone troposphérique sous l'effet des activités humaines et de son impact sur le climat », Mémoire d'Habilitation à Diriger des Recherches (HDR), Université Pierre et Marie Curie (Paris 6), 78 pages.

Hauglutaine D., J. Jouzel & H. Le Treut, 2004, *Climat, chronique d'un bouleversement annoncé*, Éd. Le Pommier, Presses de la Cité (2004).

Hawes Richard, 1995, "The Control of Alkali Pollution in St. Helens, 1862–1890." *Environment and History* 1, no. 2 (June 1995), pp. 159-71. http://www.environmentandsociety.org/node/2829.

Hecht Gabrielle & Paul N. Edwards, 2005, « Les techniques de la guerre froide dans une perspective mondiale: le nucléaire et l'informatique comme systèmes technopolitiques » **in** Dominique Pestre (Ed.), 2005, *Deux siècles d'histoire de l'armement en France: de Gribeauval à la force de frappe*, CNRS Éditions, Paris, pp. 167-178.

Hedin Lars O. & Gene E. Likens, 1996, "Atmospheric Dust and Acid Rain", *Scientific American* **275** (1996), pp. 88-92

Heene Markus, 2013, « Les avantages du Système d'information de l'OMM pour les utilisateurs », *Bulletin de l'OMM*, Volume 62(2), 2013, pp. 25-28

Hess David, 1997, *Science Studies: An Advanced Introduction*, NYU Press, 205 pages.

Hesstvedt Eigil, 1963, "On the determination of characteristic times in a pure oxygen atmosphere", *Tellus*, XV, 1, pp. 82-88.

Heymann Matthias, 2010 (a), "Lumping, testing, tuning: the invention of an artificial chemistry in the atmospheric transport modelling", *Studies in History and Philosophy of Modern Physics*, 41 (2010), pp. 218-232.

Heymann Matthias, 2010 (b), "Understanding and misunderstanding computer simulation: The case of atmospheric and climate science—An introduction", *Studies in History and Philosophy of Modern Physics*, 41 (2010), pp. 193–200.

Heyward Clare & Rayner Steve, 2013, "A Curious Asymmetry: Social Science Expertise and Geoengineering", Climate Geoengineering Governance Working Paper Series: 007, UK Economic and Social Research Council (ESRC) and the Arts and Humanities Research Council (AHRC), Published online 29 November 2013, http://geoengineering-governance-research.org/perch/resources/workingpaper7heywardrayneracuriousasymmetry.pdf (le 16/12/2013)

Hirsch Daniel, 1988, *Bulletin of the Atomic Scientists*, Vol. 5, n° 4 (May 1988), "Review" of Edward Teller's *Better a Shield than a Sword : Perspectives on Defense and Technology* (1987), pp. 48-49.

Holloway Anne & Richard Wayne (Ed.), 2010, *Atmospheric chemistry*, Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society, Volume 137, Issue 657, April 2011 Part B, 260 pages.

Horneck G., 1995, "Exobiology, the study of the origin, evolution and distribution of life within the context of cosmic evolution: a review", *Planetary and Space Science*, Vol. 43 (1/2), pp. 189-217.

Horwitch Mel, 1982, "Clipped Wings: The American SST Conflict", MIT Press, Cambridge (Mass.), 473 pages.

Hough Susan E., 2008, "Seismology and the International Geophysical Year", *Historical Seismologist, March/April 2008*, http://www.seismosoc.org/publications/SRL/SRL_79/srl_79-2_hs.html (04/01/2011)

Hourdin Frédéric, 2011, "6. Les paramétrisations physiques" **in** *La Modélisation du Climat*, http://www.lmd.jussieu.fr/~hourdin/PUBLIS/110329_LivreClimat_IV.6_10.pdf (20/10/2011), pp. 150-151.

Howe Joshua P., 2014, *Behind the Curve: Science and the Politics of Global Warming*, University of Washington Press, Seattle & London, 298 pages.

Howe Joshua P., 2010, *Making Global Warming green: Climate Change and American Environmentalism, 1957-1992*, "A dissertation submitted to the Department of History and the Committee on Graduate Studies of Stanford University in partial fulfillment of the requirements for the degree of Doctor of Philosophy" (July 2010), online at: http://purl.stanford.edu/cp892qc1059 (06/07/2013), 367 pages.

Hoyle Fred, 1984, *New Scientist,* "the Martians are here", review of *the Greening of Mars*, 6 Sept. 1984, p. 43

Huet Sylvestre, 2010, « Le tourisme spatial : une menace climatique », Libération (Blog de), 22 octobre 2010, http://sciences.blogs.liberation.fr/home/2010/10/le-tourisme-spatial-une-menace-climatique.html#tp (02/12/2010)

Hughes Agatha C. & Thomas P. Hughes (Eds), 2000, *Systems, Experts, and Computers: The Systems Approach in Management and Engineering, World War II and After*, MIT Press.

Hulme Mike, 2014, *Can science fix climate change? A case against climate engineering*, Polity Press.

Hulme Mike, 2012, "Climate change: Climate engineering through stratospheric aerosol injection", *Progress in Physical Geography* published online 9 August 2012, pp. 1-12

Hunt B. G., 1966, "Photochemistry of Ozone in a Moist Atmosphere", *Journal of Geophysical Research*, 71 (1966), p. 1385

Hunten Donald M., 1975, "Estimates of Stratospheric Pollution by an Analytic Model", *Proceedings of the NAS of the USA*, vol. 72, n° 12 (Dec. 1975), "Communicated by Harold S. Johnston, September 22, 1975", pp. 4711-4715.

Illich Ivan, 2004 (1990), « L'histoire des besoins », version définitive de 1990, faisant suite à une étude écrite pour une rencontre à la Penn State University, en septembre 1988, organisée par Wolfgang Sachs sur le thème « Après le développement, quoi ? », et republiée en 2004 **in** Illich, 2004, *La perte des sens*, Fayard, pp. 71-105.

IGBP (Site web de l'), 2014, "Earth system science", http://www.igbp.net/researchprojects/earthsystemscience.4.d8b4c3c12bf3be638a8000682.html (05/08/2014)

IGBP, 2004, *Global Change and the Earth System. A Planet Under Pressure*, "Executive Summary", Steffen W., Sanderson R.A., Tyson P.D., Jäger J., Matson P.A., Moore III B., Oldfield F., Richardson K., Schellnhuber H.J., Turner B.L., Wasson R.J., Series: Global Change - The IGBP Series (closed), New York: Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 41 pages.

IO3C's website, 2011, http://ioc.atmos.illinois.edu/ (15/02/2011)

IPCC (WG I), 2014, Assessment Report n°5 (AR5), http://www.ipcc.ch/publications_and_data/publications_and_data_reports.shtml (10/10/2014)

IPCC (WG III), 2014, Assessment Report n°5 (AR5), http://www.ipcc.ch/publications_and_data/publications_and_data_reports.shtml (10/10/2014)

IPCC, 2012, *IPCC Expert Meeting on Geoengineering*, Edenhofer, O., R. Pichs-Madruga, Y. Sokona, C. Field, V. Barros, T. F. Stocker, Q. Dahe, J. Minx, K. Mach, G. Plattner, S. Schlömer, G. Hansen, M. Mastrandrea. (Eds.), Meeting Report, Lima, Peru, 20-22 June 2011, 99 pages

IPCC (WG I), 2007, Assessment Report n°4 (AR4), http://www.ipcc.ch/publications_and_data/publications_and_data_reports.shtml (10/10/2014)

IPCC, 2005, *Safeguarding the ozone layer and the global climate system*, IPCC/TEAP Special Report, 2005.

IPCC (WG I), 2001, Third Assessment Report (TAR), http://www.ipcc.ch/publications_and_data/publications_and_data_reports.shtml (10/10/2014)

IPCC (WG III), 2001, Third Assessment Report (TAR), http://www.ipcc.ch/publications_and_data/publications_and_data_reports.shtml (10/10/2014)

IPCC (WG I), 1995, Second Assessment Report (SAR), http://www.ipcc.ch/publications_and_data/publications_and_data_reports.shtml (10/10/2014)

IPCC (WG I), 1990, First Assessment Report (FAR), http://www.ipcc.ch/publications_and_data/publications_and_data_reports.shtml (10/10/2014)

IPSL (Site web de l'), 2014, http://www.ipsl.fr/Organisation/A-propos-de-l-IPSL & http://www.ipsl.fr/Organisation/Les-laboratoires (05/08/2014)

Isaksen Ivar S.A., Y.-P. Lee, R. Atkinson, H. Sidebottom, Jan S. Fuglestvedt, C. Johnson, J. Lelieveld & A. Thompson, 1992, "Tropospheric processes: Observations and interpretation", *Global Ozone Research and Monitoring Project, Report no. 25*, World Meteorological Organization

Ivanov M.V., 1983, "Major Fluxes of the Global Biogeochemical Cycle of Sulphur" **in** SCOPE, n° 19, *the Global Biogeochemical Sulphur Cycle*, Ivanov & Freney (Ed.), Chapter 7, pp. 449-463.

Jacob François, 1977, "Evolution and tinkering", *Science*, vol. 196, n° 4295, 10 June 1977, pp. 1161-1166.

Jacobson Mark Z., 2002, *Atmospheric Pollution – history, science and regulation*, Cambridge University Press, 399 pages.

Jaenicke Ruprecht, 1998, "Christian E. Junge, 1912-1996", *Bulletin of the American Meteorological Society*, American Meteorological Society, http://www.iara.org/newsfolder/pioneers/6AerosolPioneerEditedAugJunge.pdf (28/02/2011), 10 pages.

Jalkanen Liisa, 2009, "WMO Global Atmosphere Watch (GAW) Programme", 44 slides, http://ozone.unep.org/Meeting_Documents/research-mgrs/7orm/Jalkanen_GAW.ppt (09/10/2013)

Jasanoff Sheila, 2004, "The idiom of co-production", chapter 1, pp. 1-12 **in** Sheila Jasanoff (ed.), *States of Knowledge: The Co-Production of Science and Social Order*; London: Routledge.

Jasanoff Sheila, 2003, "Technologies of humility: citizen participation in governing science", *Minerva* 41 (3), pp. 223-244.

Jasanoff Sheila, 2001, "Image and Imagination: The Formation of Global Environmental Consciousness," **in** C. Miller and P. N. Edwards, 2001, *Changing the Atmosphere: Expert Knowledge and Environmental Governance*, MIT Press.

Jasanoff Sheila, 1995, "Procedural Choices in Regulatory Science", *Technology in Society*, Vol. 17, No. 3, pp. 279-293

Jasanoff Sheila, 1990, *The Fifth Branch: Science Advisers as Policymakers*, Cambridge, MA: Harvard University Press.

Johnston Harold, 2005 (1999), An Interview Conducted by Sally Smith Hughes, Ph.D. in 1999, Copyright © 2005 by The Regents of the University of California, http://digitalassets.lib.berkeley.edu/roho/ucb/text/johnston_harold.pdf (10/ 02/ 2013), 171 pages

Johnston Harold, 1992, "Atmospheric Ozone", *Annual Review of Physical Chemistry*, 1992.43, pp. 1-31. Downloaded from www.annualreviews.org by 89.2.102.123 on 09/18/12.

Johnston Harold, 1971, « Reduction of Stratospheric Ozone by Nitrogen Oxide Catalysts from Supersonic Transport Exhaust », *Science*, Vol. 173, no. 3996 (6 August 1971), pp. 517-522.

Johnson Stephen B., 1997, "Three approaches to Big Technology: operations research, system engineering, and project management", *Technology and Culture*, vol. 38, No. 4 (Oct. 1997), pp. 891-919.

Joly Pierre-Benot, 2001, « Les OGM entre la science et le public ? Quatre modèles pour la gouvernance de l'innovation et des risques », *Economie rurale*, n° 266, 2001, pp. 11-29.

Junge Christian, 1963, *Air Chemistry and Radioactivity*, Academic Press, New York, 133 pages.

Kahn Sylvain (Producteur et animateur), 2014, « Le système énergétique global est-il au bord du court-circuit ? », émission radiophonique du 26 mars 2014, *France Culture, Planète Terre*, Invité : Bernadette Mérenne-Schoumaker, Jean-Louis Bobin, Benoit Thévard, http://www.franceculture.fr/emission-planete-terre-le-systeme-energetique-global-est-il-au-bord-du-court-circuit-2014-03-26 (05/09/2014)

Kanakidou M., F.J. Dentener, G.P. Brasseur, T.K. Berntsen, W.J. Collins, D.A. Hauglustaine, S. Houweling, I.S.A. Isaksen, M. Krol, M.G. Lawrence, J.-F. Müller, N. Poisson, G.J. Roelofs, Y. Wang & W.M.F. Wauben, 1999, "3-D global simulations of tropospheric CO distributions - results of the GIM/IGAC intercomparison 1997 exercise", *Chemosphere: Global Change Science*, 1, pp. 263-282

Keith David, 2000, "Geoengineering the Climate. History and Prospect", *Annu. Rev. Energy Environ.*, 25, pp. 245-284

Kellogg W. & S. Schneider, 1974, *Science*, New series, Vol. 186, No 4170 (Dec. 27, 1974), pp. 1163-1172

Klein Naomi, 2008, "How science is telling us all to revolt", *Newstatesman,* Published 29 October 2013, http://www.newstatesman.com/2013/10/science-says-revolt (05/04/2014)

Klein Naomi, 2008 (2007), *La stratégie du choc. La montée du capitalisme du désastre*, titre original : *The Shock Doctrine: The Rise of Disaster Capitalism*, Leméac/Actes Sud, 668 pages.

Keyser Hans (Ed.), 1977, *Bulletin of the Society of Pharmacological and Environmental Pathologists*, Vol V, n°1 (March, 1977), 20 pages.

Kieken Hubert, 2004, « RAINS : modéliser les pollutions atmosphériques pour la négociation internationale », *Revue d'Histoire des Sciences*, 57/2, pp. 379-408.

Kiss Alexandre & Jean-Pierre Beurier , 2004, *Droit international de l'environnement*, Etudes Internationales, 2004 (n°3), Ed. Pedone, 3ème édition, 505 pages.

Kiss Alexandre-Charles & Claude Lambrechts, 1970, « Les dommages causés au sol par les vols supersoniques », Annuaire français de droit international, volume 16, 1970, pp. 769-781.

Kiss Alexandre-Charles, 1975, "Les modifications artificielles du temps », *Annuaire français de droit international*, volume 21 (1975), pp. 792-800.

Köhler A., 1988, "WMO's activities on background atmospheric pollution and integrated monitoring and research", *Environmental Monitoring and Assessment*, Volume 11, Issue 3, pp. 253-268.

Kowalok M.E., 1993, « Common threads: Research lessons from acid rain, ozone depletion, and global warming », *Environment* 35 (6): 12-20, « Stratospheric Ozone Depetion », pp. 35-38.

Koyré Alexandre, 2008 (1961), « Perspectives sur l'histoire des sciences », Communication au colloque d'Oxford de juillet 1961 **in** *Etudes d'histoire de la pensée scientifique*, Gallimard, 1973 (1966), reproduit dans Braunstein (Ed.), 2008, *L'Histoire des Sciences. Méthodes, styles et controverses*, Vrin, pp. 147-158.

Kuiper G.P. (ed.), 1952, *The Atmospheres of the Earth and Planets*, Chicago: Univ. of Chcago Press, 2nd edition.

Kuiper G.P. (ed.), 1954, *The Earth as a Planet*, Chicago: Univ. of Chicago Press.

Kwa Chunglin, 2001, "The Rise and Fall of Weather Modification: Changes in American Attitudes towards Technology, Nature and Society", **in** Clark Miller & Paul Edwards (eds.), *Changing the Atmosphere: Expert Knowledge and Environmental Governance*, Cambridge, Ma: MIT Press, 2001, pp. 135-165.

Lacaze J., 1972, *Météorologie et aérodynamique de la pollution atmosphérique (à l'usage des industriels, des urbanistes et des hygienists)*, Editions Jacques Fréal, 82 pages.

Lafontaine Céline, 2006, « Le Québec Nanotech : les discours publics en matière de nanotechnologie entre promotion et fascination, *Quadremi*, n° 61, Automne 2006, pp. 39-53

Lam Y. F. & J. S. Fu, 2009, "A novel downscaling technique for the linkage of global and regional air quality modeling", *Atmos. Chem. Phys.*, 9, pp. 9169–9185.

Lambright Henry, 2005, *NASA and the Environment – the case of ozone depletion*, Monographs in Aerospace History No. 38, NASA SP-2005-4538 (May 2005), 68 pages.

Lambright Henry, 1995, "NASA, ozone, and policy-relevant science", *Research Policy*, 24 (1995), pp. 747-760.

Lamy Jérôme, 2007, "Penser les rapports entre science et politique : enjeux historiographiques récents », *Cahiers d'histoire. Revue d'histoire critique*, 102/2007, mis en ligne le 1 octobre 2010, http://chrhc.revues.org/242 (le 6 juin 2013).

Lang Agathe van, 2002, *Droit de l'environnement*, PUF, « Thémis : Droit », 502 pages

Langmuir Charles H. & Broecker Wally, 2012, *How to Build a Habitable Planet : The Story of Erth from the Big Bang to Humankind*, Princeton University Press, 720 pages.

Langner J. & H. Rodhe, 1991, "A Global Three-Dimensional Model of the Tropospheric Sulfur Cycle", *Journal of Atmospheric Chemistry*, 13, pp. 225-263.

Latour Bruno, 2009, « Sphères et réseaux :deux façons de saisir le global », *ouverture.org, les études du CFA, n°26*, septembre 2009, conférence donnée à Harvard-GSD avec Peter Sloterdijk le 17/02/2009, traduit de l'anglais par Jean Saavedra ; publication originale : « Spheres and Networks. Two Ways to Reinterpret Globalization », *Harvard Design Magazine*, Spring/Summer, n°30, pp.138-144, 2009, avec permission.

Latour Bruno, 2006 (1991), *Nous n'avons jamais été modernes. Essai d'anthropologie symétrique*, Paris, La Découverte, « Poche / Sciences humaines et sociales ».

Laval Frank, 2008, *Pollution de l'air : 63 millions de contaminés*, Editions du Rocher, « Collection : Grenelle de l'Environnement », 120 pages.

Lawrence Mark G., 2006. "Geoengineering: encouraging research and overseeing implementation. *An Editorial Comment*", *Climatic Change* (2006) 77 (3-4), pp. 245-248.

Leeuw Frank A.A.M. (de), 2002, "A set of emission indicators for long-range transboundary air pollution", *Environmental Science & Policy*, 5(2), April 2002, pp. 135-145

Leighton Philip A., 1961, *Photochemistry of Air Pollution*. Academic Press, New York, 304 pages.

Lenton Timothy M., Hermann Held, Elmar Kriegler, Jim W. Hall, Wolfgang Lucht, Stefan Rahmstorf & Hans Joachim Schellnhuber, 2008, "Tipping Elements in the Earth's Climate System", *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 105 (6), pp. 1786–93.

Lenton T.M., K.G. Caldeira & E. Szathmary, 2004, "What Does History Teach Us about the Major Transitions and Role of Disturbances in the Evolution of Life and of the Earth System?" **in** Schellnhuber *et al.* (Ed.), 2004, chapter 2, pp. 29-52.

Lents James M., 1998, "Making clean air programs work, *Environmental Science& Policy*, 1 (1998), pp. 211-222

Lepeltier Serge, 2004, « Mondialisation : une chance pour l'environnement ? », Rapport d'information n° 233 (2003-2004) fait au nom de la délégation du Sénat pour la planification, déposé le 3 mars 2004, http://www.senat.fr/rap/r03-233/r03-23324.html (12/02/2013)

Lerner K. Lee & Lerner Brenda Wilmoth (Ed.), 2003, *World of earth science*, LIBRARY OF CONGRESS CATALOGING-IN-PUBLICATION DATA, Gale (Gale is an imprint of The Gale Group, Inc., a division of Thomson Learning, Inc.), USA, ISBN 0-7876-7739-6 (set)—ISBN 0-7876-7740-X (v. 1)—ISBN 0-7876-7741-8 (v. 2), http://geolib.ukrgeo.org/index.php?option=com_jdownloads&Itemid=3&view=finish&cid=15646&catid=358&m=1 (le 05/01/2012)

Le Roux Thomas, « Les nuisances artisanales et industrielles à Paris, 1770-1830 », doctorat d'histoire, Université de Paris 1, 2007.

Levy David L., 1997, « Business and International Environmental Treaties: Ozone Depletion and Climate Change », *California Management Review*, Vol. 39, n°3 (Spring 1997), pp. 54-71.

Lindsay J., Dumont S., Bouchard J., & Auger F., 1999, « Le travail interdisciplinaire », Ecole de service social, Université de Laval.

Litfin Karen, 2005, "Gaia theory: intimations for global environmental politics" **in** Dauvergne Peter (Ed.), 2005, *Handbook of Global Environmental Politics*, Edvard Elgar, Northampton, MA, pp. 502-517.

Litfin Karen, 1995, "Framing Science: Precautionary Discourse and the Ozone Treaties", *Millennium - Journal of International Studies*, n° 24, pp. 251-277.

Litfin Karen, 1994, *Ozone Discourses. Science and Politics in Global Environmental Cooperation*, Columbia Press. Dans ce mémoire de thèse, nous utilisons une version électronique de l'ouvrage, mise en ligne à l'adresse Internet http://library.northsouth.edu/Upload/Ozone%20Discourses.pdf (10/09/2012). Nous avons utilisé la pagination de cette version, qui a été réalisée de manière indépendante pour chacun des chapitres (Ex: "chapter 3, p. 12" = « 12ème page du chapitre 3 »).

Lions Jacques-Louis, 1989 **in** Lions Jacques-Louis (Dir.), 1989, *Pollution, atmosphère et climat : Ozone, effet de serre, déforestation*, Actes du Colloque de Lassay (4 mars 1989, Paris), Larousse, 166 pages.

Liou K.N., 1998, "Richard M. Goody Receives 1998 William Bowie Medal. Citation", http://192.102.233.13/about/honors/union/bowie/goody_richardm.shtml (10/10/2011)

Liu S.C. & T.M. Donahue, 1973, "the Aeronomy of Hydrogen in the Atmosphere of the Earth", *Journal of Atmospheric Sciences*, Vol. 31, pp. 1118-1136.

Locher Fabien, 2008, *le Savant et la Tempête – étudier l'atmosphère et prévoir le temps au XIXème siècle*, Presses Universitaires de Rennes.

Locher Fabien & Grégory Quenet, 2009, « L'histoire environnementale : origines, enjeux et perspectives d'un nouveau chantier », *Revue d'Histoire moderne et contemporaine*, 56(4), numéro spécial « Histoire de l'environnement », oct.-déc. 2009, pp. 7-38.

Logan Jennifer A., Michael J. Prather, Steven Wofsy & Michael B. McElroy, 1981, "Tropospheric Chemistry: A Global Perspective", *Journal of Geophysical Research*, Vol. 86, no. C8, August 20, 1981, pp. 7210-7254.

Logan Jennifer A., Michael J. Prather, Steven Wofsy & Michael B. McElroy , 1978, "Atmospheric Chemistry: Response to Human Influence", *Phil. Trans. R. Soc. Lond. A*, Communicated by David Bates (F.R.S.), September 4, 1978, 290, 1367, pp. 187-234

Long Bill L., 2000, *International Environmental Issues and the OECD, 1950-2000. An Historical Perspective*, OECD, 154 pages.

Lövbrand Eva, Johannes Stripple & Bo Wiman, 2009, "Earth System governmentality. Reflections on science in the Anthropocene", *Global Environmental Change,* 19 (2009), pp. 7-13.

Lövbrand Eva & Johannes Stripple, 2006, "The climate as political space: on the territorialisation of the global carbon cycle", *J. reviews of international studies*, Vol 32, No 2, pp. 217-236.

Lovell, 1959, *Planetary and space science*, Volume 1, Issue 1, January 1959, p. 1.

Lovelock's official website, 2014, Site Internet official de James Lovelock, http://www.jameslovelock.org/ (04/09/2014)

Lovelock James, 2013, "Papers by James Lovelock", http://www.jameslovelock.org/page4.html (le 04/06/2013), *James Lovelock's website*.

Lovelock James, 2011 (1), "Planetary Atmospheres: Compositional and other Changes Associated with the Presence of Life", Lovelock's 1969 paper (*Advances in the Astronautical Sciences*, **25**, pp.179-193, 1969) with a contemporary author's note, http://www.jameslovelock.org/page19.html (09/09/2011), *James Lovelock's website*.

Lovelock James, 2011 (2), "Significant scientific contributions", http://www.jameslovelock.org/page3.html (09/09/2011), *James Lovelock's website*.

Lovelock James, 2009 (1), *The Vanishing face of Gaia: A final warning*, Basic Books.

Lovelock, 2009 (2), "James Lovelock: "Humans are too stupid to prevent climate change"", *The Guardian*, propos rapportés par Leo Hickman, 29 March 2010, http://www.theguardian.com/science/2010/mar/29/james-lovelock-climate-change (04/01/2014)

Lovelock James, 2008, "A geophysiologist's thoughts on geoengineering", *Phil. Trans. R. Soc. A*, 2008, 366, pp. 3883-3890

Lovelock James, 2006, *The Revenge of Gaia: Why the Earth Is Fighting Back - and How We Can Still Save Humanity*, Santa Barbara (California), Allen Lane, 2006, 144 pages.

Lovelock James, 2000, *Homage to Gaia. The Life of an Independent Scientist*, Oxford University Press.

Lovelock James, 2000 (1988), *The Ages of Gaia*, Oxford University Press, First published in 1988 by Norton & Company, 267 pages.

Lovelock James, 2000 (1979), *Gaia. A new look at life on earth*, Oxford University Press, 148 pages.

Lovelock James, 1990 (1988), *The Ages of Gaia*, Oxford University Press, First published in 1988 by Norton & Company, 252 pages.

Lovelock James, 1987 (1979), *Gaia. A new look at life on earth*, Oxford University Press, 162 pages.

Lovelock J.E., 1977, "Halogenated hydrocarbons in the atmosphere", *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 1, pp. 399-406

Lovelock James E., 1975, "Natural halocarbons in the air and in the sea", *Nature*, 256, No. 5514, pp. 193-194

Lovelock J. E., 1972, "Gaia as seen through the atmosphere", *Atmos. Environ.*, 6, pp. 579-580.

Lovelock J.E., 1971, "Air pollution and climatic change", *Atmospheric Environment*, 5, pp. 403-41

Lovelock James & Sidney Epton , 1975, "The quest for Gaia", *New Scientist*, 6 February 1975, pp. 304-309.

Lovelock James E. & C.E. Giffin, 1969, "Planetary Atmospheres: Compositional and other Changes Associated with the Presence of Life », *Advances in the Astronautical Sciences*, submitted by September 1968 to the *American Astronautical Society*, **25**, pp.179-193.

Lovelock J. E. & L. Margulis, 1973, "Atmospheric homeostasis by and for the biosphere: The Gaia hypothesis", *Tellus*, 26, pp. 1-10

Lu Z., D. G. Streets, Q. Zhang, S. Wang, G. R. Carmichael, Y. F. Cheng, C. Wei, M. Chin, T. Diehl, and Q. Tan, 2010, "Sulfur dioxide emissions in China and sulfur trends in East Asia since 2000", *Atmos. Chem. Phys.*, 10, pp. 6311–6331

Lykke Erik, 1977, "Europe versus itself", *Nature*, "Letter to the Editor", Vol. 269, p. 372.

MacCracken Michael C., 1991, "Geoengineering the Climate", Submitted to the "Workshop on the Engineering Response to Global Climate Change" for "Chapter 8: Control of Greenhouse Gas Sinks and of Climate", Lawrence Livermore National Laboratory, UCRL-JC-108014, https://e-reports-ext.llnl.gov/pdf/218065.pdf (le 10/12/2013), 14 pages

MacLeod Roy Malcolm, 1965, "The Alkali Acts Administration, 1863 - 1884: the Emergence of the Civil Scientist", *Victorian Studies* 9, pp. 85-112.

Mahlman J. D., R. W. Sinclair & M. D. Schwarzkopf, 1978, "Simulated response of the atmospheric circulation to a large ozone reduction", *WMO*, publ. n° 511.

Mahrane Yannick, Marianna Fenzi, Céline Pessis & Christophe Bonneuil , 2012, « De la nature à la biosphère. L'invention politique de l'environnement global, 1945-1972 », *Vingtième Siècle. Revue d'histoire*, n°113, janvier-mars 2012, pp. 127-141.

Mandrillon Marie-Hélène, 2012, « L'expertise d'Etat, creuset de l'environnement en URSS », *Vingtième Siècle. Revue d'histoire*, n°113, janvier-mars 2012, pp. 107-116.

Margulis Lynn, 2012 (1998), « Gaïa » **in** Hache Emilie (Dir.), 2012, Ed. Amsterdam, traduction par Cyril Le Roy d'un article publié en l'anglais de 1989 (Margulis, 1998, « Gaia » **in** *The Symbiotic Planet : A New Look at Evolution*, Basic Books, pp. 140-161), pp. 251-266.

Martin Olivier, 2000, *Sociologie des Sciences*, Armand Colin, "128", Paris, 128 pages.

Massard-Guilbaud Geneviève, 2012, « La France, une « société vert clair » ? Retour sur *The Light Green Society : Ecology and Technological Modernity in France, 1960-2000* », *Vingtième Siècle. Revue d'histoire*, n°113, janvier-mars 2012, « enjeu », pp. 205-210.

Mattelart Armand & Erik Neveu, 2008 (2003), *Introduction aux* Cultural Studies, La Découverte, collection « Repères », Culture-communication, 128 pages

Mathis Charles-François, 2012, « Mobiliser pour l'environnement en Europe et aux Etats-Unis », *Vingtième Siècle. Revue d'histoire*, n°113 (janvier-mars 2012), pp. 17-27.

Matthews H. Damon, Susan Solomon & Raymond Pierrehumbert, 2012, "Cumulative carbon as a policy framework for achieving climate stabilization", *Phil. Trans. R. Soc. A*, 2012, 370, doi: 10.1098/rsta.2012.0064, published 6 August 2012, http://rsta.royalsocietypublishing.org/content/370/1974/4365.full.html# (10/01/2014), free to access, pp. 4365-4379

Matthews W. A., R.E. Basher & G.J. Fraser, 1974, "filter ozone spectrophotometer", *Pure and applied Geophysics*, Volume 112, Number 6, pp. 931-938.

Maxwell James & Forrest Briscoe, 1997, "There's money in the air: the CFC ban and DuPont's regulatory strategy, *Business strategy and the Environment*, Vol. 6 (1997), pp. 276-286

McCormick John, 1997 (1985, 1989), *Acid Earth. The politics of Acid Pollution*, Earthscan Publications, 192 pages.

McDonald Kirk T., 2012, "List of Publications of James Edward McDonald", Institute of Atmospheric Physics, University of Arizona, compiled by K.T. McDonald, updated December 31, 2012, http://www.hep.princeton.edu/~mcdonald/JEMcDonald/bib_jem.pdf (06/06/2013)

McElroy M.B., 1976, "Chemical processes in the solar system: a kinetic perspective" **in** Herschbach D.R. (Ed), 1976, *Chemical Kinetics*, Butterworth, London, pp. 127-211.

McGrath M.P., K.C. Clemitshaw, F.S. Rowland & W.G. Hehre, "Structures, Relative Stabilities, and Vibrational Spectra of Isomers of Cl_2O_2: The Role of Chlorine Oxide Dimer in Antarctic Ozone Depleting Mechanism", *J. Phys. Chem.*, 94, pp. 6126-6132.

McIntruff RM, J. Miller, J.K. Angell & Korshover, 1971, "Possible Effects on the Stratosphere of the 1963 Mt. Agung Volcanic Eruption", *Journal of Atmospheric Sciences*, Edited by the American Meteorological Society, 28, pp. 1304-1307.

McNeill John Robert, 2000, *Something new under the sun – an environmental history of the twentieth-century world,* WW Norton & Company, 421 pages.

McNeill John R. & Corrina R. Unger (Ed.), 2010, *Environmental Histories of the Cold War*, Cambridge University Press, German Historical Institute Washington, DC, New York, Washington, DC

Mégie Gérard, 1991, « Ozone : l'équilibre rompu », *Les Cahiers du MURS (*Mouvement Universel de la Responsabilité Scientifique*)*, n°23/24 - 1er/2ème trimestres 1991, pp. 69-92

Mégie Gérard, 1989, *Ozone – l'équilibre rompu*, Presses du CNRS, 261 pages.

Mégie G., M.L. Chanin, D. Ehhalt, P. Fraser, J.F. Frederick, J.C. Gille, M.P. McCormick & M. Schoeberl, 1989, "Global trends. Chapter 2" **in** *Scientific assessment of stratospheric*

ozone: 1989, Volume 1. World Meteorological Organization Global Ozone Research and Monitoring Project – Report no. 20, Geneva: World Meteorological Organization, http://www.ciesin.org/docs/011-492/011-492.html (02/10/2014

Meidan Michal, 2007, « La Chine dans une architecture post-Kyoto : réconcilier pressions internes et externes », *Perspectives chinoises*, 2007/1, http://perspectiveschinoises.revues.org/1993 (01/04/2014)

Melosi Martin V., 1979, "Urban Pollution: Historical Perspective needed"*Environmental Review: ER*, Vol. 3, No. 3 (Spring 1979), pp. 37-45

Menz Fredric C. & Hans M. Seip, 2004, "Acid Rain in Europe and the United States: An Update", *Environmental Science & Policy*, 7(4), pp. 253-265.

Merchant Carolyn, 1984, "Women of the Progressive Conservation Movement, 1900-1916", *Environmental Review*, 8, no. 1 (Spring), pp. 57-85

Metcalfe Sarah E., J. Duncan Whyatt, R.Broughton, R.G. Derwent, D. Finnegan, J. Hall, M. Mineter, M. O'Donoghue, M. A.Sutton, 2001, "Developing the Hull Acid Rain Model: Its Validation and Implications for Policy Makers", *Environmental Science and Policy*, Vol. 4, No. 1, pp. 25-37.

Meyer Jan-Henrik, 2012, « L'européanisation de la politique environnementale dans les années 1970 », *Vingtième Siècle. Revue d'histoire*, n°113 (janvier-mars 2012), pp. 117-126

Meyer-Abich Klaus M., 1981, "Socio-Economic Impacts of Carbon Dioxide Induced Climatic Changes and the Comparative Chances of Alternative Political Responses – Prevention, Compensation, and Adaptation" **in** SCOPE, 1981, *Some Perspectives of the Major Biogeochemical Cycles*, n° 17, Chapitre 10, pp. 157-170

Michaels David, 2008, *Doubt is Their Product. How Industry's Assault on Science Threatens your Health*, Oxford University Press.

Miller Clark A., 2008, "Civic epistemologies: constituting knowledge and order in political communities", *Sociology Compass*, vol. 6, n° 2, pp. 1896-1919

Miller Clark A., 2004 (a), "Climate Science and the Making of Global Political Order" **in** Sheila Jasanoff (ed.), 2004, *States of Knowledge: The Co-Production of Science and Social Order* (London: Routledge), pp. 46-66.

Miller Clark A., 2004 (b), "Resisting Empire: Globalism, Relocalization, and the Politics of Knowledge" **in** S. Jasanoff & M. Long Martello (eds), 2004, Earthly Politics, MIT Press, pp. 81-102.

Miller Clark A., 2001, "Scientific Internationalism in American Foreign Policy: the Case of Meteorology (1947-1958)" **in** Clark Miller and Paul N. Edwards (Eds), 2001, *Changing the Atmosphere: Expert Knowledge and Environmental Governance,* Cambridge, MA: MIT Press, pp. 167-218.

Miller Clark & Paul N. Edwards, 2001, "Introduction: The Globalization of Climate Science and Climate Politics" **in** Clark Miller and Paul N. Edwards (Eds), 2001, *Changing the Atmosphere: Expert Knowledge and Environmental Governance,* Cambridge, MA: MIT Press, pp. 1-30.

Millimet Daniel L., John A. List & Thanasis Stengos, 2003, "The environmental Kuznets curve: real progress or misspecified models?", *The Review of Economics and Statistics*, November 2003, 85(4), pp. 1038-1047.

Molina Mario, 2010, "Climate change – learning from the stratospheric ozone challenge" **in** Schellnhuber *et al.* (Ed.), 2010, chapter 13, pp. 155-163.

Molina Mario, 1998 **in** Tolba & Rummel-Bulska, 1998, Global Environmental Diplomacy : Negotiating Environment Agreements for the World, 1973-1992 **in** Andersen & Sarma, 2002, pp. 363-364

Molina Mario, 1995, "Mario Molina - Autobiography". Nobelprize.org. (14 Nov 2011), http://www.nobelprize.org/nobel_prizes/chemistry/laureates/1995/molina-autobio.html (05/05/2012)

Molina Mario & Sherwood Rowland, 1975, *The Ozone Question, Science,* « Letters », Vol. 190, No. 4219 (Dec. 12, 1975), pp. 1038-1040.

Molina Mario & Sherwood Rowland , 1975, "Chlorofluoromethames in the Environment", *Rev. Geophys. Space Physics*, n°13.

Molina Mario J. & Luisa T. Molina , 2004, *Megacities and Atmospheric Pollution*, Journal of Air & Waste Management, 54, 6, *Critical Review*, pp. 644-680.

Molina Mario & Sherwood Rowland, 1974, "Stratospheric sink for chlorofluoromethanes: chlorine atom-catalyzed destruction of ozone", *Nature*, n°249, 28 June 1974, p. 810-812.

Moore John H., 1991, « La coopération scientifique américano-soviétique : résultats et perspectives », *Revue d'études comparatives Est-Ouest*, Volume 22, 1991, N°1, pp. 5-19.

Morone Joseph G. & Woodhouse Edward J., 1986, *Averting Catastrophe: Strategies for Regulating Risky Technologies*, Berkeley: University of California Press, http://ark.cdlib.org/ark:/13030/ft2k4004pp/

Morrisette Peter M., 1989, "The evolution of policy responses to stratospheric ozone depletion, *Natural Resources Journal*, n° 29, pp. 793-820.

Mosley Stephen, 2009, "'A Network of Trust': Measuring and Monitoring Air Pollution in British Cities, 1912–1960." *Environment and History* 15, no. 3 (August 2009), pp. 273–302.

Moss Franck, 1975, "S.851. Cited in Congressional Record-Senate (26 February 1975), S2641", reporting the words at the hearings of the NASA's oversight committee, the Senate Committee on Aeronautical and Space Sciences, in December 1974 **in** Lambright, 2005 ; pp. 8 & 50

Mouhot Jean-François, James McKay & Matthew Hilton , 2012, « Le *greenrush* : essai d'interprétation de la « bulle verte » au Royaume-Uni dans les années 1980 », *Vingtième Siècle. Revue d'histoire*, n°113 (janvier-mars 2012), pp. 67-81.

Murat Dominique & Roca Rémi (Ed.), 2008, *Changement climatique & Satellites. Savoirs partagés*, Thales Alenia Space, 140 pages.

NAPAP (National Acid Precipitation Assessment Program), 2011, *National Acid Precipitation Assessment Program Report to Congress 2011: An Integrated Assessment*, by D.A. Burns, Lynch, J.A., Cosby, B.J., Fenn, M.E., Baron, J.S., US EPA Clean Air Markets Div., National Science and Technology Council, Washington, DC, 114 pages.

NAS (US National Academy of Sciences), 1992, "Policy Implications of Greenhouse Warming: Mitigation, Adaptation, and the Science Base", Panel on Policy Implications of Greenhouse Warming, National Academy of Sciences, National Academy of Engineering, Institute of Medicine, 944 pages.

NAS (US National Academy of Sciences), 1971, *the Atmospheric Sciences and Man's Needs. Priorities for the Future*, Committee on Atmospheric Sciences of the National Research Council, 1971, Washington D.C, 89 pages.

NAS (US National Academy of Sciences), 1992, *Policy implications of greenhouse warming: Mitigation, adaptation, and the science base*, Panel on policy implications of greenhouse warming, National Academy of Sciences, National Academy of Engineering, Institute of Medicine, 944 pages.

NASA (Site web officiel de la), 2011, « Educational resources », "Ozone Depletion, History and politics", http://www.nas.nasa.gov/About/Education/Ozone/history.html (05/01/2011)

NASA / FEA (Federal Aviation Administration) / NOAA / UNEP / WMO / Commission of the European Communities, Bundesministerium für Forschung und Technologie, 1985, *Atmospheric Ozone. 1985. Assessment of our Understanding of the Processes Controlling its Present Distribution and Change*, World Meteorological Organization, Global Ozone Research and Monitoring Project Report NO. 16", 3 volumes.

NASA, 1984, "Ozone Correlative Measurements Workshop", "Proceedings of a Workshop sponsored by the NASA Office of Space Science and Applications and the NASA Goddard Space Flight Center, held in Greenbelt, Maryland", NASA, Scientific and Technical Information Branch, *NASA Conference Publication 2362*.

NASA, 1982, "Global Change: Impacts on Habitability. A Scientific Basis for Assessment", A Report by the Executive Committee of a Workshop held at Woods Hole, Massachusetts, June 21-26, 1982, Submitted on behalf of the Executive Committee on

July 7, 1982, by Richard Goody (Chairman), National Aeronautics and Space Administration, Jet Propulsion Laboratory California Institute of Technology, Pasadena, California, 26 pages.

Nature, 1977, "Million-dollar problem – billion-dollar solution?", "Editorial", Vol. 268, No. 5616, 14 July 1977, doi:10.1038/268089a0, p. 89.

NCAR (National Center for Atmospheric Research), 1975, "Staff Notes", Vol. 10, n° 31, August 1, 1975, 17 pages.

Nebeker Frederik, 1995, *Calculating the Weather. Meteorology in the 20th Century*, Academic Press, 260 pages.

Needell Allan A., 2000, *Science, Cold War, and the American State: Lloyd V. Berkner and the Balance of Professional Ideals*, Harwood Academic Press, London.

New Scientist, 1979, "All at sea over ozone", 15 November 1979, Vol. 84, n° 1181, "This week", p. 502.

New Scientist, 1975, "Fluorocarbon File. A *New Scientist* dossier on the controversy over fluorocarbon aerosol propellants and depletion of the ozone layer", Vol.68, Number 969, 2 October 1975, pp. 7-21.

Newton David, 1995, *the Ozone Dilemma*, ABC-Clio, 195 pages

Nicolet Marcel, 1982, "The International Geophysical Year 1957/58, *WMO Bulletin*, 31, pp. 222-231, https://www.wmo.int/pages/mediacentre/documents/Int.GeophysicalYear.pdf (25/08/2014)

Nicolet Marcel, 1978, « Etude des réactions chimiques de l'ozone dans la stratosphère », *Rapport COVOS (Comité d'Etudes sur les Conséquences des Vols Stratosphériques)*, publié la même année par l'Institut Royal Météorologique de Belgique, 536 pages.

Nicolet Marcel, 1972, "Aeronomic chemistry of the stratosphere", *Planet. Space Sci.*, Vol. 20, pp. 1671-1702, Pergamon Press.

Nicolet Marcel, 1955, "Nitrogen oxides and the airglow", *Journal of Atmospheric and Terrestrial Physics*, Volume 7, July-December 1955, pp. 297-309.

Northwest Digital Archives' website, 2012, http://nwda-db.wsulibs.wsu.edu/findaid/ark:/80444/xv48580 (12/10/2011).

NRC (*National Research Council of the US National Academies*), 2009, *Global Sources of Local Pollution. An Assessment of Long-Range Transport of Key Air Pollutants to and from the United States*, Committee on the Significance of International Transport of Air Pollutants, Board on Atmospheric Sciences and Climate, Division on Earth and Life Studies, Washington, D.C., 248 pages.

Oandasan I. & Reeves S., 2005, "Key elements for interprofessional education", *Journal of Interprofessional Care*, 19 (Suppl. 1).

Oberthür Sebastian, 1999, "the EU as an International Actor: the Protection of the Ozone Layer", *Journal of Common Market Studies*, Vol. 37, n°4 (December 1999), pp. 641-659.

Ocean Studies Board of the National Research Council (NRC), 2000, *50 Years of Ocean Discovery: National Science Foundation 1950-2000*, the National Academies Press, 276 pages.

O'Connor JJ & EF Robertson, 2012, « Sydney Chapman », website of the University of Saint Andrews (Scotland), http://www-history.mcs.st-andrews.ac.uk/Biographies/Chapman.html (le 04/06/2012)

Ohring G., R.D. Bojkov, H.-J. Bolle, R.D. Hudson & H. Volkert, 2009, "Radiation and Ozone: Catalysts for Advancing International Atmospheric Science Programs for over Half a Century", *Bulletin of the American Meteorological Society*, Number 11, November 2009, "Annual Meeting Preview", "with the compliments of the IAMAS", pp. 1669-1681.

O'Keefe William & Jeff Kueter, 2013, "Clouding the Truth", *George C. Marshall Institute Policy Outlook*, June 2010, http://www.marshall.org/pdf/materials/894.pdf (01/06/2013), 9 pages.

Oldfield & Steffen, 2003 **in** Steffen *et al.*, 2003, p. 7

Olson Jennifer, Michael Prather, Terje Berntsen, Gregory Carmichael, Robert Chatfield, Peter Connell, Richard Derwent, Larry Horowitz, Shengxi Jnin, Maria Kanakidou, Prasad Kasibhatla, Rao Kotamarthi, Michael Kuhn, Kathy Law, JoycePenner, Loft Perliski, Sanford Sillman, Frode Stordal, AnneThompson & Oliver Wild, 1997, Results from the Intergovernmental Panel on Climatic Change Photochemical Model Intercomparison (PhotoComp), *JOURNAL OF GEOPHYSICAL RESEARCH*, VOL. 102, NO. D5, March 20, pp. 5979-5991.

OMM (Oganisation météorologique mondiale), 2010, Commission des sciences de l'atmosphère, Quinzième session, Incheon 18–25 novembre 2009, « Temps, Climat, Eau », OMM-N° 1050, « Rapport final abrégé », « résolutions et recommandations », ftp://ftp.wmo.int/Documents/PublicWeb/mainweb/meetings/cbodies/governance/tc_reports/french/pdf/1050_fr.pdf (20/09/2014), 89 pages

Oreskes Naomi, 2012, « Des chercheurs touchent beaucoup d'argent pour attaquer la science », Entretien pour le journal *le Monde*, 29/03/2012, Propos recueillis par Stéphane Foucart, http://www.lemonde.fr/planete/article/2012/03/29/des-chercheurs-touchent-beaucoup-d-argent-pour-attaquer-la-science_1677518_3244.html (05/02/2014)

Oreskes Naomi, 1994, "Weighing the earth from a submarine: the gravity measuring cruise of the U.S.S. S-21", *History of Geophysics*, 5, 1994, pp. 53-68

Oreskes Naomi & Conway Erik M, 2013, "The Collapse of Western Civilization: A View from the Future", *Dædalus, the Journal of the American Academy of Arts & Sciences*, pp.40-58.

Oreskes Naomi & Conway Erik M, 2010, *Merchants of Doubt: How a Handful of Scientists Obscured the Truth on Issues from Tobacco Smoke to Global Warming*, Bloomsbury Press, London.

Ottar Brynjulf, 1976, "Organization of Long Range Transport of Air Pollution Monitoring in Europe", *Water, Air, and Soil Pollution*, 6 (1976), pp. 219-229

Ottinger Gwen, 2010, "Buckets of Resistance: Standards and the Effectiveness of Citizen Science", *Science, Technology & Human Values*, 35(2), pp. 244-270.

Owen Kenneth, 1997, *Concorde and the Americans: International Politics of the Supersonic Transport*, Washington, D.C.: Smithsonian Institution Press

Owens, A.J., C.H. Hales & D.J. Wuebbles, 1985, "Trace gas influences on climate from 1980 to 2050", *Proceedings of the AMS Conference on Climate Variations*, Los Angeles, 1985, January 8–11.

Pachauri Rajendra, 2010, "Insights into the climate challenge" **in** Schellnhuber *et al.* (Ed.), 2010, chapter 12, pp. 81-99.

Parson Edward A., 2003, *Protecting the ozone layer – science and strategy*, Oxford University Press, 377 pages.

Paterson M.P. & Richard S. Scorer, 1973, "Data quality and the European Air Chemistry Network", *Atmospheric Environment*, Volume 7, Issue 12, December 1973, pp. 1163–1171

Patt Anthony, 1999, "Separating Analysis from Politics: Acid Rain in Europe", *Policy Studies Review*, 16(3/4), http://www.hks.harvard.edu/gea/pubs/e-98-20.pdf (09/09/2014), 19 pages

Pereira Ângela Guimarães, Frank Raes, Tiago De Sousa Pedrosa, Paulo Rosa, Søsser Brodersen, Michael Søgaard Jørgensen, Francisco Ferreira, Xavier Querol, John Rea, 2009, "Atmospheric composition change research: Time to go post-normal?", *Atmospheric Environment*, Volume 43, Issue 33 (October 2009), « ACCENT Synthesis », pp. *5423-5432*.

Persson G., 1981, "Socio-Economic Impacts of the Effects of Man on Biogeochemical Cycles: Sulphur" **in** SCOPE, 1981, *Some Perspectives of the Major Biogeochemical Cycles*, n° 17, Chapitre 9, pp. 145-156

Pestre Dominique, 2008, "Challenges for the Democratic Management of Technoscience: Governance, Participation and the Political Today", *Science as Culture*, Vol. 17, No. 2, June 2008, pp. 101–119.

Pestre Dominique, 2007 (1), *Historical Perspectives on Sciences, Society and the Political, Report to the Science, Economy and Society Directorate*, European Commission, 143 pages ; publié la même année par la Commission européenne sous le titre *Science, Society and Politics : Knowledge Societies from a Historical Perspective*.

Pestre Dominique, 2007 (2), "The Historical Heritage of the 19th and 20th Centuries: Techno-science, Markets and Regulations in a Long-term Perspective", *History and Technology*, vol. 23, n°4 (December 2007), pp. 407-420.

Pestre Dominique, 2006, *Introduction aux Science Studies*, La Découverte, Collection, Repères, 128 pages.

Pestre Dominique, 2004 (a), « Le nouvel univers des sciences et des techniques : une proposition générale » **in** Dahan Amy & Pestre Dominique (Dir.), 2004, *Les sciences pour la guerre (1940-1960)*, Paris, Éditions de l'École des hautes études en sciences sociales, pp. 11-41.

Pestre Dominique, 2004 (b), « Repenser les variantes du complexe militaire-industriel-universitaire » **in** Dahan Amy & Pestre Dominique (Dir.), 2004, *Les sciences pour la guerre (1940-1960)*, Paris, Éditions de l'École des hautes études en sciences sociales, pp. 195-221.

Pestre Dominique, 2004 (c), « Sciences physiques et recherche industrielle et militaire en France : un changement historique de régime » **in** Dahan Amy & Pestre Dominique (Dir.), 2004, *Les sciences pour la guerre (1940-1960)*, Paris, Éditions de l'École des hautes études en sciences sociales, pp. 317-341.

Pestre Dominique, 2003, *Science, argent et politique, un essai d'interprétation*, Versailles Cedex, Editions Quæ, Coll. « Sciences en questions », 204 pages.

Phalen Robert F & Robert N Phalen, 2012, *Introduction to air pollution science : a public health perspective*, Jones and Bartlett Publishers, 333 pages

Planetary and space science, 1959-1991, Pergamon Press.

Polanyi Michael, 1962, "The Republic of Science: its Political and Economic Theory", *Minerva*, Vol. 1 (October 1962), pp. 54-73.

Pontin Ben, 2007, "Integrated Pollution Control in Victorian Britain: Rethinking Progress with the history of Environmental Law", *Journal of Environmental Law* (2007),Vol 19, No 2, pp. 173–199

Pomeranz Kenneth, 2009, *La force de l'empire. Révolution industrielle et écologie, ou pourquoi l'Angleterre a fait mieux que la Chine*, Ere, coll. « Chercheurs d'ère », 157 pages.

Popovics Maria M., Dezso J. Szepesi & Charles S. Hakkarinen, 1987, "Historical data of atmospheric sulfur in three monitoring periods for Europe", *Water, air & soil pollution*, 36 (1987), Springer, pp. 47-59

Prins G., Galiana I., Green C., Grundmann R., Hulme M., Korhola A., Laird F., Nordhaus T., Pielke Jr. R., Rayner S., Sarewitz D., Shellenberger M., Stehr N. & H. Tezuka, 2010, *The Hartwell Paper: A New Direction for Climate Policy after the Crash of 2009*. Joint research paper of the Institute for Science, Innovation and Society and the MacKinder Programme for the Study of Long-Wave Events, Institute for Science, Innovation and Society, Oxford.

Prinz B., 1976, « Normes de qualité de l'air ambiant et applications » **in** Suess M.J. & Craxford S.R. (eds), 1976, "Manual on urban air quality management", WHO (OMS), Copenhagen, WHO European series, No. 1, pp. 55-70 ; consulté en ligne sur http://whqlibdoc.who.int/euro/es/EURO_SERIES_1_fre_(chp4).pdf (06/07/2013).

Raiffa Howard, 2012, « Science and Policy: Their Separation and Integration in Risk Analysis », *The American Statistician*, Vol. 36, No. 3, Part 2: Proceedings of the Sixth Symposium on Statistics and the Environment (Aug., 1982), pp. 225-231.

Rigby Malcolm & Keehn Pauline A., 1963, « Bibliography of the publications of Harry Wexler », *Monthly Weather Review*, Oct.-Dec. 1963, pp. 477-481

Roan Sharon L., 1989, *Ozone Crisis. The 15 Year Evolution of a sudden Global Emergency*, John Wiley & Sons, 270 pages.

Rockström, J., W. Steffen, K. Noone, Å. Persson, F. S. Chapin, III, E. Lambin, T. M. Lenton, M. Scheffer, C. Folke, H. Schellnhuber, B. Nykvist, C. A. De Wit, T. Hughes, S. van der Leeuw, H. Rodhe, S. Sörlin, P. K. Snyder, R. Costanza, U. Svedin, M. Falkenmark, L. Karlberg, R. W. Corell, V. J. Fabry, J. Hansen, B. Walker, D. Liverman, K. Richardson, P. Crutzen, & J. Foley, 2009, "Planetary boundaries: exploring the safe operating space for humanity", *Ecology and Society*, 14(2): 32 pages; [online] URL: http://www.ecologyandsociety.org/vol14/iss2/art32/ (le 10/10/2013)

Rodhe Henning, 2000, "Book review about "Guy P. Brasseur, John J. Orlando, and Geoffrey S. Tyndall" (eds), 1999, *Atmospheric Chemistry and Global Change*, Oxford University Press, New York", *Journal of Atmospheric Chemistry*, "Book Reviews", 36, pp. 107–108.

Rodhe Henning, Paul Crutzen & A. Vanderpol, 1981, "Formation of sulfuric and nitric acid in the atmosphere during long range transport", *Tellus*, 33, pp. 132-14.

Roney P.L., 1965, "On the influence of water vapour on the distribution of stratospheric ozone", *Journal of Atmospheric and Terrestrial Physics*, Volume 27, Issues 11-12, November-December 1965, pp. 1177-1190.

Roqueplo Philippe, 1988, *Pluies acides : menaces pour l'Europe*, Economica, Paris.

Ross, M., M. Mills & D. Toohey (2010), "Potential climate impact of black carbon emitted by rockets", *Geophys. Res. Lett.*, 37, L24810, doi:10.1029/2010GL044548.

Roth Heinz, 2001, "Twentieth century developments in photochemistry. Brief historical sketches", *Pure Appl. Chem.*, Vol. 73, No. 3, pp. 395–403.

Rowland Sherwood, 1995, "Sherwood Rowland – Autobiography". Nobelprize.org. (13 Jan 2012), http://www.nobelprize.org/nobel_prizes/chemistry/laureates/1995/rowland-autobio.html (05/05/2013)

Rowland Sherwood, 1975, "Chlorofluoromethanes and stratospheric ozone – a scientific status report", *New Scientist*, Vol.68, Number 969, 2 October 1975, pp. 8-11.

Rowland F. S. & Molina Mario J., 1975, *The Ozone Question, Science,* "Letters", Vol. 190, No. 4219 (Dec. 12, 1975), pp. 1038-1040.

Royal Society (the), 2009, Geoengineering the climate: science, governance and uncertainty, the Royal Society, September 2009, Report 10/09 RS1636, 83 pages

Ruse Michael, 2013, "The Gaia Hypothesis: Science on a Pagan Planet", the University of Chicago Press.

Russian Federation, 2011, "Russian Federation National Report on Studies of the Earth Ozone Layer (The) ", http://ozone.unep.org/Meeting_Documents/research-mgrs/8orm/Russian%20Federation.pdf (10/10/2014)

Rowan-Robinson Michael, 1985, *Fire & Ice. The nuclear winter*, Longman, 118 pages.

Rygalov Vidim, 2010, "Closed Loop Ecological System" **in** Johnson *et al.* (Ed.), 2010, *Space Exploration and Humanity: A Historical Encyclopedia*, ABC-Clio, pp. 555-556.

Sagan Carl & Turco Richard, 1991 (1990), *L'hiver Nucléaire*, titre original : *A Path Where no Man Thought* (traduit de l'américain par Jean-Baptiste Grasset), Seuil, 454 pages.

Scattergood Thomas, 1987, "Laboratory experiments in the study of the chemistry of the outer planets", *Advance Space Research*, Vol. 7, No. 5, pp. 99-108.

SCEP (Study of Critical Environmental Problems), 1970, *Man's Impact on the Global Environment: Assessment and Recommendations for Action*, Cambridge: MIT Press, 1970.

Schaffer Simon, 1994, "Gestures in Question" **in** Chandler James, Arnold Davidson & Harry Harootunian (Ed), 1994, *Questions of Evidence: Proof, Practice, and Persuasion Across Disciplines*, Chicago University Press, 1994, pp. 98-104.

Schellnhuber Hans Joachim, 2011, "Geoengineering: The good, the MAD, and the sensible", *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America,* December 20, 2011, Vol. 108, no. 51, pp. 20277–20278

Schellnhuber Hans Joachim, Mario Molina, Nicholas Stern, Veronika Huber & Susanne Kadner (Ed.), 2010, *Global Sustainability. A Nobel Cause*, 392 pages.

Schellnhuber Hans Joachim, Paul Crutzen, William Clark & Julian Hunt, 2005, "Earth system analysis for sustainability", *Environment*, Vol. 47, Issue 8 (2005), pp. 10-25.

Schellnhuber Hans Joachim, Paul J. Crutzen, William C. Clark, Martin Claussen & Hermann Held (Ed.), 2004, *Earth System Analysis for Sustainability*, Report on the 91st Dahlem Workshop (2003), Cambridge, MA: MIT Press, 460 pages.

Schellnhuber H.J, 1999, "'Earth system' analysis and the second Copernican revolution", *Nature,* Volume 402, Issue 6761, C19-C23.

Schellnhuber H.J. & Wenzel V. (Ed.), 1998, *Earth System Analysis: Integrating Science for Sustainability*. Springer Verlag, Berlin, 540 pages.

Schofield Carl L., 1976 (1), "Acidification of Adirondack lakes by atmospheric precipitation: extent and magnitude of the problem", *N.Y. State Dept. Environ. Conserv. Final Report, Project F-28-R*.

Schofield Carl L., 1976 (2), "Acid precipitation: Effects on fish", *Ambio*, 5(5- 6), pp. 228 -230

Schleicher Nina, Stefan Norra, Mathieu Fricker, Uwe Kaminski, Yizhen Chen, Fahe Chai, Shulan Wang, Yang Yu & Kuang Cen, 2013, "Spatio-temporal variations of black carbon concentrations in the Megacity Beijing", *Environmental Pollution*, 182 (2013), pp. 392-401

Schneider Stephen, 2008, "Geoengineering: could we or should we make it work?", *Phil. Trans. R. Soc. A* (2008), 366, pp. 3843-3862.

Schneider Stephen, 2001, "Earth systems engineering and management", *Nature*, Vol. 409, 18 January 2001, pp. 417-421

Schneider Stephen, 1996, "GEOENGINEERING: COULD - OR SHOULD - WE DO IT? », *Climatic Change* 33, pp. 291-302.

Schneider S.H., J.R. Miller, E. Crist & P.J. Boston (Eds.), 2008 (2004), *Scientists Debate Gaia: 2000*, MIT Press.

Schnell J. L., C.D. Holmes, A. Jangam & M.J. Prather, 2014, "Skill in forecasting extreme ozone pollution episodes with a global atmospheric chemistry model", *Atmos. Chem. Phys. Discuss.*, 14, pp. 6261-6310

Schreurs Miranda A., 2007, "The Politics of Acid Rain in Europe", Chapter 7 **in** Gerald R. Visgilio & Whitelaw (Ed.), 2007, *Acid in the Environment: Lessons Learned and Future Prospects*, Springer Science & Media, pp. 119-150.

Schuepbach E., E. Uherek, A. Ladstätter-Weissenmayer, M.J. Jacob, 2009, "Educating the next generation of atmospheric scientists within a European Network of Excellence", *Atmospheric Environment*, Volume 43, Issue 33 (October 2009), « ACCENT Synthesis », pp. 5415-5422.

Schweber Sylvan S., 2000, *In the Shadow of the Bomb: Oppenheimer, Bethe, and the Moral Responsibility of the Scientist*, Princeton University Press, Princeton.

Science News, 1974 (1), « Fluorocarbons and Ozone : New Predictions Ominous », *Science News*, Oct. 5 1974, vol. 106, n° 14, pp. 212-213.

Science News, 1974 (2), « Earth Sciences », *Science News*, Mar. 9 1974, vol. 105, n° 10, p. 160.

SCOPE (Scientific Committee on Problems of the Environment), 2008, "A Review of the Scientific Committee on Problems of the Environment (SCOPE)", Prepared by Professor Geoffrey Oldham, *ICSU* (2008), http://www.icsu.org/publications/reports-and-reviews/scope-review/SCOPE-Review.pdf (05/09/2014), 54 pages

SCOPE, 1985, *Environmental Consequences of Nuclear War, Volume I - Physical and Atmospheric Effects*, N° 28, A. Barrie Pittock (Commonwealth Scientific and Industrial Research Organization, Division of Atmospheric Research), Thomas P. Ackerman (National Aeronautics and Space Administration, Ames Research Center), Paul J. Crutzen (Max Planck Institut fur Chemie), Michael C. MacCracken (Lawrence Livermore National Laboratory), Charles S. Shapiro (San Francisco State University and Lawrence Livermore National Laboratory) (Ed.), SCOPE 28-I *Published on behalf of the* Scientific Committee on Problems of the Environment (SCOPE) of the International Council of Scientific Unions (ICSU), JOHN WILEY & SONS, Copyright 1986: Scientific Committee on Problems of the Environment

SCOPE, 1981, *Some Perspectives of the Major Biogeochemical Cycles*, N° 17, Edited by: Gene E. Likens, Published on behalf of the Scientific Committee on Problems of the Environment (SCOPE) of the International Council of Scientific Unions (ICSU), JOHN WILEY & SONS, 1981, 175 pages

Scorer Richard Segar, 1997, *Dynamics of Meteorology and Climate*, John Wiley & Sons Ltd in association with Praxis Publishing Ltd, Series in Atmospheric Physics, 688 pages.

Scorer Richard Segar, 1990 (1), *Meteorology of Air Pollution. Implications for the environment and its future*, Ellis Horwood, Series in Environemental Science, 160 pages.

Scorer Richard Segar, 1990 (2), *Satellite as Microscope*, Ellis Horwood, Series in Environmental Science, 268 pages.

Scorer Richard Segar, 1986, *Cloud Investigation by Satellite*, Ellis Horwood, Series in Environmental Science.

Scorer Richard Segar, 1978, *Environmental Aerodynamics*, Ellis Horwood Ltd, Series in Mathematics & its Applications, 488 pages.

Scorer Richard Segar, 1977 (1), *The Clever Moron*, Routledge & Kegan Paul Ltd, London, 171 pages

Scorer Richard Segar, 1977 (2), "Halocarbons, environmental effects of chlorofluoromethanes release. Report of the committee on impacts of stratospheric change", *Atmospheric Environment*, Vol. 11, Issue 7, 1977, pp. 655-657.

Scorer Richard Segar, 1977 (3), "The stability of stratospheric ozone and its importance", *Atmospheric Environment*, Vol. 11, Issue 3, 1977, pp. 277-281.

Scorer Richard Segar, 1976 (1), "A commentary on ozone depletion theories", *Atmospheric Environment*, Vol. 10, Issue 2, 1976, pp. 177-180.

Scorer Richard Segar, 1976 (2), "Author's Reply", *Atmospheric Environment*, Vol. 10, Issue 12, 1976, pp. 1148-1149.

Scorer Richard Segar, 1975, "The danger of environmental jitters", *New Scientist*, 26 June 1975, pp. 702-703.

Scorer Richard Segar, 1973, "Author's Reply to Herbert C. McKee", *Atmospheric Environment*, Pergamon Press, Vol. 7, pp. 228-229.

Scorer Richard Segar, 1972 (1), *A Radical Approach to Pollution, Population and Resources*, 'A Liberal Party Publication', First Series, n°1, "Strategy 2,000", Ed. 'the Liberal Party', 33 pages.

Scorer Richard Segar, 1972 (2), "Author's Reply", *Atmospheric Environment*, Vol. 6, Issue 7, 1976, pp. 505-506.

Scorer Richard Segar, 1971 (1), "The crime of pollution standards", *Atmospheric Environment*, Pergamon Press, Vol. 5, followed by a "reply" by H. Reiquam, pp. 819-820

Scorer Richard Segar, 1971 (2), "New attitudes to air pollution – the technical basis of control. Review Paper", *Atmospheric Environment*, Pergamon Press, Vol. 5, pp. 903-931

Seibert Günther, 2006, "The History of Sounding Rockets and Their Contribution to European Space Research", Report of the European Space Agency, HSR-38, November 2006, 68 pages.

Seinfeld John H., 1986, *Atmospheric Chemistry and Physics of Air Pollution*, John Wiley & Sons, A Wiley Interscience Publications.

Seinfeld John H. & Wen H. Chen, 1973, "Optimal distribution of air pollution sources", *Atmospheric Environment*, Vol. 7, 1976, pp. 87-99.

Semb Arne, 2001, "Sulphur dioxide: from protection of human lungs to remote lake restoration" **in** Harremoës *et al.* (Editors), 2001, Chapter 10, pp. 101-109.

Shackley Simon & Brian Wynne, 1996, "Representing Uncertainty in Global Climate Change Science and Policy: Boundary-Ordering Devices and Authority", *Science, Technology, & Human Values*, Vol. 21, No. 3 (Summer, 1996), pp. 275-302.

Shindell, D.T., O. Pechony, A. Voulgarakis, G. Faluvegi, L. Nazarenko, J.-F. Lamarque, K. Bowman, G. Milly, B. Kovari, R. Ruedy, and G. Schmidt, 2013, "Interactive ozone and methane chemistry in GISS-E2 historical and future climate simulations", *Atmos. Chem. Phys.*, 13, pp. 2653-2689.

Shue Henry, 1993, "Subsistence and Luxury Emissions", *Law & Policy*, Volume 15, Number 1, January 1993, article revised for publication after a paper presented at the symposium "Above the boundaries: Ozone Depletion, Equity and Climate Change" (annual meeting of the Law and Society Association in Philadelphia in May, 1992), pp. 39-59.

Smith F.B. & Jeffrey G.H., 1975, "Airborne transport of sulphur dioxide from the U.K." (November 1974), *Atmospheric Environment*, Vol. 9 (1975), pp. 643-659.

Smith Robert Angus, 1872, *Air and Rain – the Beginnings of a Chemical Climatology*, Longmans, Green and Co, London, 666 pages.

Smith Tyrrel W., Edwards John R. & Daniel Pilson, 1999, « Summary of the Impact of Launch Vehicle Exhaust and Deorbiting Space and Meteorite Debris on Stratospheric Ozone », Prepared for: U.S. Air Force Space and Missile Systems Center Environmental Management Branch, SMC/AXFV, Under Contract F09603-95-D-0176-0007, 30 September 1999, 146 pages.

Social Learning Group (the), 2001, *Learning to Manage Global Environmental Risks – Volume 1: A Comparative History of Social Responses to Climate Change, Ozone Depletion, and Acid Rain*, MIT Press.

Solomon Susan, Pierrehumbert Raymond T., Matthews Damon, Daniel John S. & Friedlingstein Pierre, 2013, "Atmospheric Composition, Irreversible Climate Change, and Mitigation Policy" **in** Asrar Ghassem R. & James W. Hurrell (Eds.), 2013, *Climate Science for Serving Society. Research, Modeling and Prediction Priorities*, pp. 415-436.

Solomon Susan, Pierrehumbert Raymond T., Matthews Damon & Daniel John S., 2011, "Atmospheric composition, irreversible climate change, and mitigation Policy", "Position Paper at WCRP Meeting", 27 october 2011, téléchargeable en ligne sur le site du WCRP, http://www.wcrp-climate.org/conference2011/documents/Solomon.pdf (16/12/2013), 39 pages.

Solomon Susan, 2011, "Atmospheric composition, irreversible climate change, and mitigation policy", Poster at the WCRP Meeting, 27 october 2011, 42 Slides, communication personnelle.

Solomon Susan, 1999, "Stratospheric Ozone depletion: a review of concepts and history", *Reviews of Geophysics,* 37, 3 / August 1999, American Geophysical Union, pp. 275–316.

Soroos M.S., 1998, *The Endangered Atmosphere*", *Human Ecology*, Vol. 26, No. 2 (1998), pp. 347-349.

Soroos Marvin S., 1997, *The Endangered Atmosphere. Preserving a Global Commons*, University of South Carolina, 345 pages

Sportisse Bruno, 2008, *Pollution atmosphérique. Des processus à la modélisation*, Springer, collection « Ingénierie et développement durable », 345 pages.

Sportisse Bruno, 2007, *Modélisation et simulation de la pollution atmosphérique*, Habilitation à Diriger les Recherches Université Pierre et Marie Curie, Présentée et soutenue publiquement le 4 juin 2007 par, Spécialité : Sciences de l'Univers, 81 pages.

Star Susan & James Griesemer, 1989, "Institutional Ecology, 'Translations' and Boundary Objects: Amateurs and Professionals in Berkeley's Museum of Vertebrate Zoology. 1907-39", *Social Studies of Science*, 19 (3), pp. 387–420

Steinberg "Ted" Theodore, 1986, "An Ecological Perspective on the Origins of Industrialization", Environmental History Review, 10 (Winter 1986), pp. 261–276.

Stengers Isabelle, 2009, *Au temps des catastrophes. Résister à la barbarie qui vient*, La Découverte, 204 pages.

Stern David I., 2004, "The Rise and Fall of the Environmental Kuznets Curve", *World Development*, Vol. 32, No. 8, pp. 1419–1439.

Stern Nicholas & Su-Lin Garbett-Shiels, 2010, "Towards a global deal on climate change" **in** Schellnhuber *et al.* (Ed.), 2010, chapter 7, pp. 81-99.

Steffen W. (Rapporteur), Andreae M.O., Bolin B., Cox P.M., Crutzen P.J., Cubasch U., Held H., Nakicenovic N., Talaue-McManus L. & Turner II B.L., 2004, "Chapter 16. Group Report: Earth System Dynamics in the Anthropocene" **in** Schellnhuber *et al.* (Ed.), 2004, pp. 313-340

Steffen Will, Paul Crutzen & John McNeill, 2007, "The Anthropocene: Are Humans Now Overwhelming the Great Forces of Nature?", *Ambio*, 36 (8), 2007, pp. 614-621

Steffen Will, Jacques Grinevald, Paul Crutzen & John McNeill, "The Anthropocene: conceptual and historical perspectives", 2011, *Philosophical Transactions of the Royal Society A,* 369(1938), pp. 842-867

Stephens Jennie C. & David Keith, 2008, "Assessing geochemical carbon management", *Climatic Change* (2008) 90, pp. 217–242.

Stoddard J. L., D.S. Jeffries, A. Lükewille , T.A. Clair , P.J. Dillon , C.T. Driscoll, M. Forsius, M. Johannessen, J. S. Kahl, J.H. Kellogg, A. Kemp, J. Mannio, D. T. Monteith, P. S. Murdoch, S. Patrick, A. Rebsdorf, B. L. Skjelkvale, M. P. Stainton, T. Traaen, H. van

Dam, K. E. Webster, J. Wieting & A. Wilander, 1999, "Regional trends in aquatic recovery from acidification in North America and Europe", *Nature*, Vol. 401, 7 October 1999, pp. 575-578

Stolarski Richard S., 1982, Fluorocarbons and Stratospheric Ozone: A Review of Current Knowledge, *The American Statistician*, Vol. 36, No. 3, Part 2: Proceedings of the Sixth Symposium on Statistics and the Environment (Aug., 1982), pp. 303-311.

Stolarski Richard S., G.J. Labow & R.D. McPeters, 1997, "Springtime Antarctic total ozone measurements in the early 1970s from the BUV instrument on Nimbus 4", *Geophys. Res. Lett.*, 24, pp. 591–594.

Stolarski R. S. & Cicerone R. J., 1974, "Stratospheric Chlorine: A Possible Sink for Ozone", *Can. J. Chem.*, 52, Received January 18, 1974, pp. 1610-1615.

Straf Miron L., 2012, « Preface » & « Risk Assessment in Environmental Decision Making », *The American Statistician*, Vol. 36, No. 3, Part 2: Proceedings of the Sixth Symposium on Statistics and the Environment (Aug., 1982), pp. 221-224

Stubbs Peter, 1963, "May rockets disturb the weather?", *New Scientist*, 1st August 1963, n° 150, pp. 230-233.

Sullivan Walter, 1961, *Assault on the Unknown. The International Geophysical Year*, McGraw-Hill Book Company Inc., New York, Toronto, London.

Sundberg Mikaela, 2007, "Parametrizations as Boundary Objects on the Climate Arena", *Social Studies of Science 37/3 (juin 2007)*, SSS and SAGE Publications, pp. 473-488.

Sundqvist Göran, Martin Letell , Rolf Lidskog , 2002, "Science and Policy in Air Pollution Abatement Strategies", *Environmental Science & Policy*, n°5 (2002), pp. 147-156.

Swift Byron, 2005, "U.S. Emissions Tradings: Myths, Realities, and Opportunities", *Natural Resources & Environment*, Vol. 20, No. 1 (Summer 2005), pp. 3-9.

Tatarewicz Joseph N., 1990, *Space technology & planetary astronomy*, Indiana University Press, 208 pages.

Teller, E., L. Wood, and R. Hyde, "Global warming and Ice Ages: I. Prospects for physics-based modulation of global change", *UCRL-JC-128715*, Lawrence Livermore National Laboratory, Livermore, California, U.S., 20 pages.

Terrall Mary, 2002, *The man who flattened the Earth – Maupertuis and the Sciences in the Enlightenment*, Chicago and London, The University of Chicago Press, pp. 130-137.

Thamattor Dasan M., 2010, "Chapter 19: Stratospheric Ozone Depletion and Greenhouse Gases since the International Geophysical Year: F. Sherwood Rowland and the Evolution of Earth Science" **in** Launius, Fleming & Devorkin (Ed.), 2010, *Globalizing Polar Science – Reconsidering the International Polar and Geophysical Year*,

Palgrave Editions, "Palgrave Studies in the History of Science and Technology", pp. 355-371.

Theys Jacques & Bernard Kalaora, 1992, « Quand la science réinvente l'environnement » **in** Theys & Kalaora (Dir.), 1992, *La Terre outragée. Les experts sont formels !*, Editions Autrement, Série Sciences en société n° 1, pp. 15-49

Thorpe Charles, 2007, "Political Theory in Science and Technology Studies" **in** E.J. Hackett, O. Amsterdamska, M. Lynch & J. Wajcman (eds), 2007, *The Handbook of Science and Technology Studies*, 3rd edition, pp. 63-82.

Tilford Shelby, 2009, "EARTH SYSTEM SCIENCE AT 20 ORAL HISTORY PROJECT ORAL HISTORY TRANSCRIPT", INTERVIEWED BY REBECCA WRIGHT WASHINGTON, D.C. – JUNE 23, 2009, http://www.jsc.nasa.gov/history/oral_histories/NASA_HQ/ESS/TilfordSG/tilfordsg.htm (14/04/2011), 53 pages.

Tolba Mostafa, 1996 **in** Lang, 1996, *The Ozone Treaties…* **in** Andersen & Sarma, 2002, p. 363.

Tørseth K., W. Aas, K. Breivik, A. M. Fjæraa, M. Fiebig, A. G. Hjellbrekke, C. Lund Myhre, S. Solberg & K.E. Yttri, 2012, "Introduction to the European Monitoring and Evaluation Programme (EMEP) and observed atmospheric composition change during 1972–2009", *Atmos. Chem. Phys.*, 12, pp. 5447–5481.

Touscoz Jean, 1965, « La coopération aéronautique franco-britannique : l'affaire Concorde », *Annuaire français de droit international*, volume 11, 1965, pp. 174-192.

Trail M., A. P. Tsimpidi, P. Liu, K. Tsigaridis, Y. Hu, A. Nenes & A. G. Russell, 2013, Downscaling a global climate model to simulate climate change over the US and the implication on regional and urban air quality, *Geosci. Model Dev.*, 6, pp. 1429–1445.

Tyrrell Toby, 2013, *On Gaia. A Critical Investigation of the Relationship between Life and Earth*, Princeton University Press, 320 pages.

UK Committee on Climate Change, 2013, "Reducing the UK's carbon footprint", April 2013, http://www.theccc.org.uk/wp-content/uploads/2013/04/Reducing-carbon-footprint-report.pdf (15/04/2014), 108 pages

Ungar Sheldon, 1998, "Bringing the Issue back in: comparing the marketability of the ozone hole and global warming", *Social Problems*, Vol. 45, n°4 (November 1998), pp. 510-527.

United Nations, 1951, *Yearbook of the United Nations*, "Part 2: The specialized agencies", "Chapter K: The World Meteorological Organization (WMO)", pp. 951-960.

U.S. Department of Energy, 2009, *Modern Shale Gas Development in the United States: A Primer*, Work Performed Under DE-FG26-04NT15455, Prepared for U.S. Department of Energy

Office of Fossil Energy and National Energy Technology Laboratory, Prepared by Ground Water Protection Council Oklahoma City, April 2009, 97 pages.

U.S. Department of Energy, 1998, "A Look Back at the U.S. Department of Energy's Aquatic Species Program: Biodiesel from Algae", National Renewable Energy Laboratory, NREL/TP-580-24190, July, 1998, 295 pages.

US EPA (Environmental Protection Agency), 2013, *Site de l'EPA*, http://www.epa.gov/ozone/intpol/mpagreement.html (04/04/2014)

US NAS (National Academy of Sciences), 1992, *Policy implications of greenhouse warming: Mitigation, adaptation, and the science base*, Panel on policy implications of greenhouse warming, National Academy of Sciences, National Academy of Engineering, Institute of Medicine, 944 pages.

Vaughan Naomi E. & Timothy M. Lenton, 2011, "A review of climate geoengineering proposals", *Clim. Change*, 109, pp. 745-790

Vázquez Manuel & Hanslmeier Arnold, 2006, *Ultraviolet Radiation in the Solar System*, Springer, "Astrophysics and Space Science Library", 382 pages.

Vernier Jean-Pierre, 2010, « Les aérosols et le transport dans la haute troposphère et la stratosphère tropicale à partir des mesures du lidar spatial CALIPSO », thèse de doctorat présentée à : l'Université de Versailles Saint-Quentin en Yvelines pour obtenir le grade de docteur de l'université en sciences de l'atmosphère (le 09/02/2010), https://tel.archives-ouvertes.fr/file/index/docid/669120/filename/These_J.P.Vernier.pdf (04/10/2014)

Vieille-Blanchart Elodie, 2007, « Croissance ou stabilité ? L'entreprise du Club de Rome et le débat autour des modèles » **in** Dahan-Dalmedico (dir.), 2007, pp. 19-43

Walker Kenny & Lynda Walsh, 2010, "'No One Yet Knows What the Ultimate Consequences May Be': How Rachel Carson Transformed Scientific Uncertainty into a Site for Public Participation in *Silent Spring*", *Journal of Business and Technical Communication* 26(1), January 2010, pp. 3-34.

Wallace L., 1962, "the OH Nightglow Emission", *Journal of Atmospheric Sciences*, Edited by the American Meteorological Society, 19(1), pp. 1-16.

Wang, W.C., D.J. Wuebbles, W.M. Washington, R.G. Isaacs & G. Molnar, 1986, "Trace gases and other potential perturbations to global climate", *Rev. Geophysics, 24,* pp. 110–140

Ward Barbara & René Dubos (Dir.), 1974 (1972), *Nous n'avons qu'une terre*, Ed. J'ai Lu, "Documents", traduction de l'anglais américain (*Only One Earth*) sous la direction de Paul Alexandre (Ed. Denoël, 1972), 435 pages.

Ward Barbara & René Dubos (Ed.), 1972, *Only One Earth. The Care and Maintenance of a Small Planet*, "an unofficial report commissioned by the Secretary-General of the United Nations Conference on the Human Environment", Penguin, 304 pages.

Warwick Norton & Emily Shuckburgh , 2009, "Alan W. Brewer (1915-2007): the discovery of stratospheric dryiness", *The Eggs*, European Geosciences Union Newsletter, pp. 17-18.

Watson Geoffrey S., 1982, "Stratospheric Ozone-Observations and Data Analysis", *The American Statistician*, Vol. 36, No. 3, "Part 2: Proceedings of the Sixth Symposium on Statistics and the Environment" (Aug., 1982), pp. 312-316.

Weart Spencer, 2012, « History of contributions of planetary studies to the science of climate change », *the Encyclopedia of Earth*, http://www.eoearth.org (le 20/04/2012)

Weart Spencer with Paul N. Edwards, 2004, "General Circulation Models of Climate," *The Discovery of Global* Warming, expanded web version of Weart's book of the same title, Harvard University Press, Cambridge, 2004, http://www.aip.org/history/climate/GCM.htm (09/08/2014)

Webb Willis Lee, 1966, *Structure of the stratosphere and mesosphere*, "International geophysics series", Vol.9., Academic Press Inc. , 382 pages.

Weinstein Milton C., 2012, « Issues in Risk Assessment and Analysis for the Chlorofluorocarbon Problem », *The American Statistician*, Vol. 36, No. 3, Part 2: Proceedings of the Sixth Symposium on Statistics and the Environment (Aug., 1982), pp. 317-320

Wexler Harry, 1958, "Modifying Weather on a Large Scale", *Science*, New Series, Vol. 128, No. 3331 (Oct. 31, 1958), pp. 1059-1063

White Richard, 1983, *The Roots of Dependency: Subsistence, Environment, and Social Change among the Choctaws, Pawnees, and Navajos*, University of Nebraska Press, Lincoln, 433 pages

White Richard, 1980, *Land Use, Environment, and Social Change: The Shaping of Island County*, University of Washington Press, 234 pages

WHO, 1961, "Air Pollution", *World Health Organization Monograph Series*, n°46, WMO: Geneva.

Willett Hurd, 1968, "Remarks on the Seasonal Changes of Temperature and of Ozone in the Arctic and the Antarctic Stratospheres", *Journal of Atmospheric Sciences*, Edited by the American Meteorological Society, 25(3), pp. 341-360.

Wilson Andrew, 1973, *The Concorde Fiasco*, Middlesex, Penguin Books

Winstanley Derek, Robert T. Lackey, Walter L. Warnick, John Malanchuk, 1998 "Acid rain: Science and policy making", *Environmental Science & Policy*, 1, pp. 51-57

WMO, 2012, WMO website, "Historical development of the World Weather Watch, http://www.wmo.int/pages/themes/oceans/www_en.html (12/05/2012)

WMO/GAC (Global Atmosphere Watch), 2000, WMO/EMEP/UNEP Workshop on Modelling of Atmospheric Transport and Deposition of Persistent Organic Pollutants and Heavy Metals (Geneva, Switzerland, 16-19 November 1999), *GAW Report* n° 136, Volumes I & II.

WMO/iGAC, 2012, *Impacts of Megacities on Air pollution and Climate*, Lead authors : Tong Zhu, Megan Melamed, David Parrish, Michael Gauss, Laura Gallardo Klenner, Mark Lawrence, Abdourahamane Konare & Cathy Liousse, GAW Report No. 205, September 2012, 305 pages.

WMO/UNEP/EC/NOAA/NASA, 2011, *Scientific Assessment of ozone Depletion: 2010*, Report of the 2010 Assessment of the Scientific Assessment Panel, World Meteorological Organization Global Ozone Research and Monitoring Project – Report No.52, http://ozone.unep.org/new_site/en/assessment_docs.php?committee_id=7 (10/10/2014)

WMO/UNEP/EC/NOAA/NASA, 2007, *Scientific Assessment of ozone Depletion: 2006*, http://ozone.unep.org/new_site/en/assessment_docs.php?committee_id=7 (10/10/2014)

WMO/UNEP/EC/NOAA/NASA, 2003, *Scientific Assessment of ozone Depletion: 2002*, http://ozone.unep.org/new_site/en/assessment_docs.php?committee_id=7 (10/10/2014)

WMO/UNEP/EC/NOAA/NASA, 1999, *Scientific Assessment of ozone Depletion: 1998*, http://ozone.unep.org/new_site/en/assessment_docs.php?committee_id=7 (10/10/2014)

WMO/UNEP/EC/NOAA/NASA, 1995, *Scientific Assessment of ozone Depletion: 1994*, http://ozone.unep.org/new_site/en/assessment_docs.php?committee_id=7 (10/10/2014)

WMO/UNEP/EC/NOAA/NASA, 1992, *Scientific Assessment of ozone Depletion: 1991*, http://ozone.unep.org/new_site/en/assessment_docs.php?committee_id=7 (10/10/2014)

WMO/UNEP/United Kingdom – Department of the Environment/EC/NOAA/NASA, 1989 (1), *Scientific Assessment of Stratospheric Ozone: 1989, Volume 1*, WORLD METEOROLOGICAL ORGANIZATION GLOBAL OZONE RESEARCH AND MONITORING PROJECT - REPORT NO. 20, 486 pages

WMO/UNEP/United Kingdom – Department of the Environment/EC/NOAA/NASA, 1989 (2), *Scientific Assessment of Stratospheric Ozone: 1989, Volume 2 : Appendix : AFEAS Report*,

WORLD METEOROLOGICAL ORGANIZATION GLOBAL OZONE RESEARCH AND MONITORING PROJECT - REPORT NO. 20, 536 pages

WMO, 1980, "Operations Handbook – Ozone observations with a Dobson spectrometers", Prepared by W. D. Komhyr for the 'World Meteorological Organization Global Ozone Research and Monitoring Project', 140 pages

Woods Tom, Cahalan Robert, Rottman Gary & Ohring George, 2012, "A Tribute to Julius London", *International Radiation Commission*'s website, http://www.irc-iamas.org/resources/jlondon/jlondon.php (10/09/2012)

Wuebbles Donald, 2009, Curriculum Vitæ on line, July 8, 2009, http://www.atmos.illinois.edu/~wuebbles/cv.pdf (04/04/2010), 33 pages

Wuebbles Donald J., M.C. MacCracken & F.M. Luther, 1984, "A proposed reference set of scenarios for radiatively active atmospheric constituents", *Carbon Dioxide Research Division Report DOE/NBB-O066,* U.S. Department of Energy, Lawrence Livermore National Laboratory, Livermore, CA

Wuebbles D., 1983, "Chlorocarbon Emission Scenarios: potential impact on stratospheric ozone", *Journal of Geophysical Research*, 88, pp. 1433-1443

Wuebbles D.J., F.M. Luther & J.E. Penner, 1983, "Effects of coupled Anthropogenic perturbations on Stratospheric Ozone", *Journal of Geophysical Research*, 88, pp. 1444-1456

Wuebbles Donald J., 1981, "The relative efficiency of a number of halocarbons for destroying stratospheric ozone", *Report UCID*-18924, Lawrence Livermore National Laboratory, Livermore, Livermore CA.

Zimmermann Maurice, 1905, « L'étude de la haute atmosphère », Annales de Géographie, Année 1909, Volume 18, Numéro 100, pp. 371-373

Zimmermann Maurice, 1895, « Météorologie de la haute atmosphère », Annales de Géographie, Année 1895 Volume 4, Numéro 16, pp. 380-381.

Index des Tableaux et des Figures

Tableaux

Tableau 1 : Les arènes publiques
Tableau 2 : (a) Temps de vie atmosphérique d'ODS et de leurs substituts, calculé à l'aide de plusieurs modèles numériques, et (b) leurs ODP et GWP, recensés par le premier 'Ozone Assessment'
Tableau 3 : Les propriétés de neuf réfrigérants, dont le CFC, d'après ses inventeurs, en 1930
Tableau 4 : Les différents types de modèles numériques, classés selon leur résolution spatiale
Tableau 5 : Chimie atmosphérique pertinente dans la science du changement climatique, d'après le Premier rapport du GIEC
Tableau 6 : « Modèles de chimie-transport (CTM) ayant contribué à l'évaluation OxComp, « visant à prédire l'O_3 et l'OH troposphériques »

Figures

Figure 1 : Couches atmosphériques, phénomènes et procédés d'études de la haute atmosphère (a) en 1942 et (b) en 2011
Figure 2 : Cinq nomenclatures atmosphériques, proposées au début des années 1950 par Goody, Flöhn et Penndorf, et Chapman
Figure 3 : Photographie de Gordon Dobson vers 1950
Figure 4 : Variations annuelles de la colonne totale d'ozone, d'après les travaux de Dobson entre 1924 et 1942
Figure 5 : (a) Amplitude moyenne des concentrations d'ozone en fonction de l'altitude, d'après différents travaux de référence des années 1930, et (b) d'après le dernier rapport du groupe d'experts internationaux sur la destruction de l'ozone (2010)
Figure 6 : Instruments de mesures disposés en 1926-27 à Arosa, dans les Alpes
Figure 7 : Couches atmosphériques ionisées, selon S. Chapman (1931)
Figure 8 : La spectrométrie de l'ozone atmosphérique comme « zone d'échange » entre disciplines, et comme pratique instrumentale médiatrice, à partir de 1929
Figure 9 : Création et désintégration de la physique de la condensation
Figure 10 : Programmes d'étude de l'atmosphère et communautés disciplinaires engagées, dans la première moitié du XX^{ème} siècle
Figure 11 : (a) Diagramme des trois modes dominants de "circulation générale" hémisphérique par William Ferrel en 1856 ; (b) Diagramme récent de "circulation générale" (NASA) ; (c) Représentation schématique de la circulation méridionale troposphérique et stratosphérique au solstice, combinant l'activité de la cellule de Hadley et de la circulation de Brewer-Dobson
Figure 12 : Arbre généalogique des Modèles numériques de Circulation générale atmosphérique, établi par Paul Edwards
Figure 13 : Dépenses fédérales états-uniennes pour la recherche en sciences atmosphériques au cours des années 1960
Figure 14 : (a) Richard Goody en 2002 ; (b) le « Mosquito fighter-bomber », à la structure en bois, utilisé par Goody durant la Seconde Guerre Mondiale pour effectuer des mesures atmosphériques
Figure 15 : Un schème théorique complexe des interactions chimiques dans la stratosphère
Figure 16 : (a) Photographie de Christian Junge vers 1970 ; (b) représentation graphique de cinq profiles stratosphériques d'aérosols de grande taille identifiés par l'équipe de Junge
Figure 17 : Quelques collaborateurs du fameux projet de modélisation numérique du temps à l'aide d'ENIAC ('Electronic Numerical Integrator and Calculator'), en 1954

Figure 18 : (a) Préparatifs en vue d'ascensions d'une radiosonde arrimée à un bateau finnois, qui fera régulièrement la navette entre Helsinki et Rio de Janeiro au cours de l'AGI ; (b) logo de l'AGI
Figure 19 : Composition du CSAGI (Comité Spécial de l'Année Géophysique Internationale) en 1958
Figure 20 : Photographies de (a) Sydney Chapman et de (b) Marcel Nicolet vers 1960
Figure 21 : Géographie des instruments de mesure au sol de la colonne totale d'ozone du Système GAW ('Global Atmosphere Watch') de l'OMM, entre 2001 et 2004, répartis entre spectromètres Brewer, spectromètres Dobson et ozonomètres à filtre M-83
Figure 22 : Le missile V-2 équipé pour la recherche scientifique en haute altitude
Figure 23 : Principaux réseaux européens de surveillance de la pollution atmosphérique de fond, et en particulier des concentrations de SO_2 dans les eaux de pluies, entre 1954 et le début des années 1980
Figure 24 : (a) Répartition des stations BAPMoN en 1984, et (b) logo initial du GAW, qui réunit depuis 1989 le BAPMoN et le GO3OS
Figure 25 : Représentation schématique des liens entre la composition de l'atmosphère (et, avec elle, la qualité de l'air), les paramètres climatiques et les écosystèmes, tels que proposée par le Professeur John Harte (1985)
Figure 26 : Diagrammes (a) du modèle européen LRTAP de chimie-transport du SO_2 en 1976, et (b) du modèle intégré RAINS, version 7.2, de l'IIASA (vers 1990)
Figure 27 : Visibilité des pluies acides, de la destruction de l'ozone et du changement climatique, dans les médias et les revues scientifiques, au cours des années 1970-90
Figure 28 : Contribution aux émissions cumulées de substances acidifiantes de « l'Europe des quinze » entre 1980 et 1998, (a) de la part des trois principaux polluants incriminés, puis (b) de la part de chaque secteur économique
Figure 29 : Production mondiale de CFC, entre 1930 et 1974
Figure 30 : (a) Richard Scorer, le 25 juillet 1975, au NCAR (Boulder), et (b) Stephen Schneider, lors d'une réunion du 'Climate Project Advisory Committee' (entre le 21 et le 23 juillet 1975)
Figure 31 : Article du *New Scientist*, publié le 2 octobre 1975
Figure 32 : Trois schèmes de réactions chimiques troposphériques aux implications globales
Figure 33 : Cycle réactionnel des radicaux OH
Figure 34 : Représentation schématique des flux d'oxygène et de carbone entre les principaux réservoirs de l'atmosphère, de la surface et des océans de la Terre, d'après J. Lovelock (1979)
Figure 35 : Evolution des projections de l'altération anthropique de la colonne d'ozone (à l'état stationnaire), d'après les modélisateurs du 'Lawrence Livermore National Laboratory', pour deux « perturbations » jugées possibles
Figure 36 : Production et consommation des produits chimiques destructeurs d'ozone en 1986, dont la part de nocivité lié à la production des CFC-11, CFC-12, CFC-113, CFC-114 & -115, HCFC-22, méthylchloroforme (MC) et halons calculée d'après les valeurs de leurs ODP
Figure 37 : Entre 1950 et 2050, (a) masse des émissions globales d'ODS et de leurs substituts (les HCFC) ; (b) potentiel de destruction d'ozone relatif ; (c) potentiel de réchauffement climatique relatif
Figure 38 : Interactions multiples entre problématique de l'ozone et changement climatique, d'après l'*Ozone Assessment* de 2010
Figure 39 : Complexification des modèles climatiques au cours des dernières décennies
Figure 40 : Approches « séquentielle » (a) et « parallèle » (b) de développement de scénarios pour le GIEC
Figure 41 : Diagramme présentant les trois éléments modulaires (parfois nommés « modules » comme ici, ou « modèles ») qui composent typiquement un CTM
Figure 42 : Les quatre types de dimension des modèles (0-D, 1-D, 2-D, 3-D)
Figure 43 : Exemple de diagrammes schématiques de deux CTM eulériens, (a) l'un à zéro dimension, et (b) l'autre à une dimension (l'altitude)
Figure 44 : Relation entre les divers processus physico-chimiques atmosphériques (oxydation en phase gazeuse, formation et évolution des aérosols et des nuages) et les principaux enjeux environnementaux auxquels ils sont épistémologiquement liés
Figure 45 : "The IPSL Earth System Model", également nommé LMDz-OR-INCA

Figure 45 : Estimations du forçage radiatif anthropique global moyen annuel (en $W.m^{-2}$) dû aux changements de concentrations en gaz à effet de serre et aérosols, ainsi qu'aux modifications naturelles de production solaire, entre 1850 et 1995
Figure 46 : Evolution temporelle de la circulation méridionale thermohaline de l'océan Atlantique à 30°N, dans des simulations réalisées avec 19 des 23 modèles climatiques couplés AOGCM, en utilisant le scénario d'émission « SRES A1B » pour les années 1999 à 2100
Figure 47 : Forçages radiatifs dus aux changements anthropiques et naturels entre 1750 et 2011, avec leurs barres d'incertitudes associées
Figure 48 : Schéma de l'impact climatique (refroidissement ou réchauffement) de réductions d'émissions de gaz et d'aérosols à faible temps de résidence dans l'atmosphère, d'après le cinquième rapport du GIEC (2014)
Figure 49 : Evolution des concentrations d'ozone stratosphérique au cours du temps, selon plusieurs méthodes de réglementation des ODS
Figure 50 : « Déviation de température observée jusqu'en 2009, et projections d'après plusieurs scénarios »
Figure 51 : Relation entre (a) les émissions cumulées en équivalent carbone, (b) les scénarios d'émissions de CO_2 et (c) l'élévation de la température globale à l'horizon 2100

TABLE DES MATIERES

Introduction générale **13**

Partie A. *1900-1970.* Le paradigme d'une couche d'ozone en équilibre **39**

Chapitre 1. *1900-1940*. L'ozone stratosphérique, nouvel objet des géophysiciens et météorologistes **43**

1.1. Les premiers réseaux de mesure d'ozone stratosphérique **45**

Identifier le gaz Ozone 45

Les définitions disciplinaires des couches atmosphériques 47

Les réseaux matériels et humains de Gordon Dobson 52

Trois questionnements pérennes naissent des premières mesures d'ozone au-dessus d'Oxford 54

Gordon Dobson et Oxford à la tête d'un réseau international 57

1.2. La formalisation des réactions chimiques dans la haute atmosphère .. **64**

Le premier cycle photochimique de l'ozone (1929), fruit de la culture pluridisciplinaire de Sydney Chapman 65

L'intrication *ab ovo* des concentrations en ozone stratosphérique et des rayonnements UV 71

La proposition d'ingénierie atmosphérique de Chapman : « faire un trou dans la couche d'ozone » 76

Des scientifiques de l'atmosphère globale très détachés des affaires politiques 82

1.3. La compartimentation disciplinaire des sciences de l'atmosphère **87**

La situation disciplinaire des études atmosphériques au début du XX^{ème} siècle 89

Chapman, 1946 : « Un plaidoyer pour l'abolition de la « météorologie » » et pour l'avènement d'une science atmosphérique unifiée, « l'aéronomie » 91

Le paradigme radiatif et la montée en échelle de la météorologie : la tentation d'une science commune à toutes les études de l'atmosphère 93

Le rejet de la proposition de Chapman par les météorologistes, et la nouvelle acception du mot aéronomie. Une atmosphère coupée en deux. 96

Une proposition de cartographie de la recherche sur l'atmosphère dans les années 1920-30 99

Chapitre 2. *1940-1970*. La stratosphère nouvelle des sciences belligérantes 105

2.1. Le couplage de la stratosphère à la circulation générale de l'atmosphère et au climat global 109

La circulation générale troposphérique-stratosphérique des météorologistes Brewer et Dobson 110

Les sciences montantes de la circulation générale et du climat global, peu soucieuses de l'ozone 114

Météorologistes-modélisateurs, astronomes et océanologues : de la maîtrise du temps et du climat au programme sur le changement climatique d'origine anthropique 116

Le programme satellitaire des années 1960 : des mesures radiatives sans mesure d'ozone 125

2.2. Une stratosphère contaminée chimiquement par les activités au sol .127

Les composés azotés 128

Les travaux de Richard Goody 128

L'hypothèse d'un impact des composés azotés sur l'ozone stratosphérique (Bates & Hays, 1967 et Crutzen, 1970) 130

La couche d'aérosols soufrés de Junge 133

2.3. Des évènements atmosphériques massifs et subits pouvant potentiellement affecter l'ozone 138

Les éruptions volcaniques 138

Les essais nucléaires 140

2.4. Harry Wexler : « nous pouvons détruire la couche d'ozone » 142

Informer sur les risques de développement d'armes climatiques 143

L'hypothèse d'une destruction de l'ozone par les gaz d'échappement des fusées dans les brouillons de Wexler 149

C h a p i t r e 3 . Les origines "pacifiques" d'un réseau mondial de surveillance de la composition chimique de l'atmosphère 155

3.1. La construction ICSU/OMM d'un système d'observation globale de l'ozone 159

Dobson et la création de l''International Ozone Commission' (IO3C ; 1948-…) 159

Chapman et Nicolet parmi les têtes pensantes de l'Année géophysique internationale (AGI ; 1957-58) 162

L'OMM, nouveau bailleur de fonds des mesures d'ozone. La création du 'Global Ozone Observing System' (GO3OS) en 1957 172

Les ozonomètres soviétiques sur la route du « globalisme infrastructurel » promu par l'OMM 175
Les transferts de technologies vers les pays moins argentés 187
3.2. La veille internationale du SO_2 et des pollutions acides transfrontières 191
Les premiers réseaux de surveillance des pluies acides 192
Du dioxyde de soufre à la pollution de fond et aux cycles biogéochimiques 199
Pluies acides et relations internationales 206
Indices environnementaux et approches réglementaires 213
Conclusion de la Partie A 224
Partie B. *1970-84.* La controverse sociotechnique états-unienne sur la destruction de l'ozone 239
Chapitre 4. Des chimistes lanceurs d'alerte 245
4.1. La controverse sur les avions supersoniques aux Etats-Unis (1970-71) 249
L'hypothèse du chimiste de Boeing Halstead Harrison 251
Chimie, culture "globale" de la Guerre froide et modélisation numérique 251
L'anticipation de la critique environnementale et le "secret scientifique" chez Boeing 258
Le douloureux apprentissage du métier d'expert, dans une agitation médiatique intense (1970-71) 263
Haro sur "l'ufologue" James McDonald, porteur d'une alerte sanitaire alarmiste 266
La fuite du brouillon du chimiste de Berkeley Harold Johnston 268
Un débat durablement structuré en matière de réduction de l'impact sanitaire des UV 273
Les raisons multiples de la décision du Congrès de mettre fin au projet de SST 276
Sur le caractère "technocratique" de la gouvernance des SST, la catastrophe environnementale et le principe de précaution, et le "dévoiement" de l'expertise scientifique 283
4.2. L'alerte sur les CFC de Mario Molina et Sherwood Rowland (1974) 288
La culture environnementale du chimiste des smogs troposphériques Harold Johnston 291
Les aéronomes laissent un vide dans lequel s'engouffrent les météorologistes et les chimistes 291

Une mutation épistémologique de la stratosphère calquée sur celle de la troposphère une quinzaine d'années auparavant 292
Une culture de l'alerte et de la gestion des pollutions....298
Les CFC mènent les chimistes de laboratoire Molina et Rowland vers la science de la stratosphère 306

Chapitre 5. Les opposants aux réglementations des CFC ... 313

5.1. La riposte de l'Industrie..... 320

Introduction : la mobilisation de la recherche publique et de l'industrie des CFC suite à l'alerte de Molina et Rowland 320
La communication des industriels des CFC dans les médias 323
Les poussifs débuts de l'expertise scientifique privée....334

5.2. Le météorologiste Richard Scorer et le géochimiste James Lovelock, deux contradicteurs issus de la recherche publique 342

Scorer oppose les valeurs de ses pairs météorologistes aux valeurs des chimistes qui ont lancé l'alerte 344
Résister aux sirènes de la modélisation numérique....350
Les modèles bousculent les pratiques des atmosphériciens 350
Les pratiques de modélisation de la chimie de l'atmosphère dans les années 1970....352
La "conversion" de Scorer aux simulations de chimie à la fin des années 1980 358
L'entêtement de Lovelock 361
Conclusions....368

5.3. Le Scorer "politique" : la crise environnementale comme crise politique et culturelle d'un monde globalisé..... 378

S'émanciper du dogme de la croissance des "centralisateurs" 380
Des limites régionales de l'environnement à la pensée des Limites globales....380
L'ennemi numéro un : l'économiste 388
Le principe de précaution, un nouvel « évangile » à combattre 393
Faire entrer les sciences en démocratie....396
Les sciences nouvelles des années 1970 397
« Trop de science ! » 398
Ni technocrate long-termiste (le cybernéticien), ni technocrate court-termiste....402
« Les pouvoirs publics financent la recherche comme si elle était un exercice d'ingénierie dont on pourrait attendre avec confiance qu'elle accomplisse un dessein »....408
Le scientifique et ses valeurs, dans la cité....414

5.4. L'armistice de la guerre de l'ozone 417

Une défaite partielle pour l'industrie états-unienne des CFC....418
Clôture multifactorielle de la controverse, et héritage....423

Revue à la baisse des chiffres de production de CFC et des estimations de destruction d'ozone 423
Contexte politique américain, et moment de la lente harmonisation internationale 427
Un cadrage durable de la gouvernance des CFC 428

Chapitre 6. De l'affaire de l'ozone à la science holiste du système Terre ...435

6.1. La chimie stratosphérique devient un enjeu central pour les aéronomes et les scientifiques des atmosphères planétaires 438

Les scientifiques des atmosphères planétaires et le chlore des navettes spatiales 438
La solidarité entre lanceurs d'alerte 440
Le rôle proactif de l'aéronome Paul Crutzen dans la création d'une discipline scientifique nommée Chimie atmosphérique 443
Le timide programme de recherche européen sur la destruction de l'ozone. L'exemple français 451
L'affaire Concorde offre un programme de recherche non-belligérant à l'aéronomie française 452
Quelques éléments pouvant expliquer la faiblesse du programme européen, du Concorde aux CFC....455

6.2. Les prémices d'une science du Système Terre. L'exemple de la NASA 463

La "conversion environnementale" de la NASA, qui succède au CIAP comme organe référent de la science sur l'ozone aux Etats-Unis (1976) 465
La chimie troposphérique à grande échelle 469
Les cycles biogéochimiques.... 475
La montée de la thématique du changement climatique à la NASA 483

Conclusion de la Partie B 487

Partie C. *1977-2013.* Une expertise internationale, entre couche d'ozone, changement climatique et qualité de l'air 499

Chapitre 7. L'expertise internationale sur l'ozone comme expérience fondatrice 503

7.1. L'expérience scientifique et politique de construction d'une expertise internationale sur l'ozone (1977-1989) 506

L'instabilité des prédictions des modèles 507

La nécessité de renouveler le modèle d'expertise 511
Les simulations numériques : coopérer avec l'industrie, dialoguer avec les décideurs 512
Les indices environnementaux, outils de médiation entre décideurs politiques et secteurs industriels, et entre diplomates 516
L''Ozone Depletion Potential' (ODP) 516
De l'ODP au 'Global Warming Potential' (GWP) 519
ODP et « charge en chlore » 520
La construction d'un collectif 522
Produire un document unique 522
Une culture identitaire d'élite et internationale 523
7.2. Trou de la couche d'ozone et signature du Protocole de Montréal (1987) 527
L'événement trou de la couche d'ozone : une icône environnementale, et un nouveau programme de recherche 528
Ecueils scientifiques et diplomatiques 530
Chapitre 8. L'interface chimie atmosphérique – changement climatique dans les rapports internationaux 535
8.1. Introduction. « Régime climatique » et communauté scientifique 540
Le changement climatique jusqu'au milieu des années 1980 540
« Mode de vie non négociable » et « climatoscepticisme » aux États-Unis, des premiers pas du régime climatique à la "non-signature" du Protocole de Kyoto (1997) 543
La remise en question de la logique de Kyoto 546
8.2. Les substituts des CFC dans le Protocole de Kyoto et le changement climatique dans la gouvernance de l'ozone 549
Les substituts des gaz de Montréal : au-delà du co-bénéfice ozone-climat, de nouveaux gaz à effet de serre et de nouveaux risques environnementaux 550
Le changement climatique comme thématique ascendante dans les rapports d'experts internationaux sur l'ozone stratosphérique 556
Une méthode de géoingénierie stratosphérique discutée dans le 'Scientific Assessment of Ozone Depletion' de 2010 558
8.3. Chimie troposphérique et changement climatique. L'exemple de l'introduction des modèles de chimie dans les rapports du GIEC. 568
Introduction. Prolégomènes aux modèles du GIEC 569
Les scénarios d'émissions et de concentrations 569
De la confiance dans les modèles 571

Présentation des modèles globaux intégrant la chimie (CTM et CCM) 572
1990. Le GIEC dresse une liste des rétroactions connues entre chimie et changement climatique 580
1995. Les premiers résultats de modèles de chimie-transport globaux 3-D 581
Le peu d'intérêt pour la chimie stratosphérique 583
MOGUNTIA, un modèle global 3-D germano-suédois intégrant une chimie du SO_2 en phase gazeuse et en phase aqueuse 584
Les balbutiements de la modélisation globale de la chimie de l'ozone troposphérique et du méthane 588
2001. Les premiers modèles globaux de photochimie troposphérique (O_3, OH, NO_x, CO) 590
Le programme d'intercomparaison du Workshop OxComp (1999) 590
Le « Rapport spécial du GIEC sur l'aviation et l'atmosphère globale » (1999). La chimie des NO_x troposphériques, étudiée dans la lignée des travaux sur l'ozone stratosphérique 593
Le monoxyde de carbone 596
La rencontre des chimistes de l'ozone stratosphérique, des pluies acides et des pollutions urbaines dans le Chapitre 4 du TAR, prolégomènes à une chimie troposphérique globale 598
2007 & 2014. Une multitude de modèles, pour le global et le régional 604
Les premières tentatives d'intégration de la chimie atmosphérique dans les AOGCM 604
Modèles du Système de Terre de grande complexité (ESM) et de complexité intermédiaire (EMIC) 606
Des CCM couplés stratosphère-troposphère 613
Action du CC sur la qualité de l'air, déterminée par 'downscaling' des modèles climatiques globaux 615

Chapitre 9. De l'importance climatique des GES de courte durée de vie et des émissions soufrées 623

9.1. Réduire des émissions de GES de courte durée de vie afin de se maintenir sous les « +2°C » 625

La logique des paniers du Protocole de Montréal appliquée aux GES 626
Les deux paniers de Susan Solomon et ses collègues 632
« Raboter le pic » de réchauffement 633

9.2. La réduction des émissions soufrées : un « dilemme politique » ?..... 639

La métaphore du « pacte faustien » chez James Hansen 639
Dilemme du soufre et géoingénierie chez Paul Crutzen 643

Conclusion générale 649

Bibliographie..... 661

Index des Tableaux et des Figures..... 715

Résumé / Abstract

Titre : UNE HISTOIRE DE LA CHIMIE ATMOSPHERIQUE GLOBALE. Enjeux disciplinaires et d'expertise de la couche d'ozone et du changement climatique

Résumé :
L'histoire des sciences de l'environnement a, jusqu'à présent, peu documenté l'apport des *chimistes de l'atmosphère*, qui formalisent les réactions chimiques se produisant au sein de l'atmosphère. Cette thèse porte spécifiquement sur la chimie atmosphérique *globale*. La chimie de l'atmosphère a été au centre de l'expertise sur la destruction anthropique de la couche d'ozone à partir de 1970. Les chimistes de l'atmosphère ont également participé à l'élaboration des rapports du GIEC (Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat) à partir de la fin des années 1980, ainsi qu'à des travaux au sein de la science dite « du système Terre ». En combinant différentes approches de l'étude des sciences et des techniques, ce mémoire de thèse fait une histoire "sociale" du champ d'étude sur la chimie atmosphérique globale depuis les années 1920. Le cœur du récit porte sur l'évolution des pratiques scientifiques de la chimie atmosphérique globale, les reconfigurations disciplinaires et sociales, et l'apparition de nouvelles formes d'expertise et de figures d'expert propres à ce champ d'étude. L'auteur examine dans le détail trois "moments" : les deux premières décennies de la Guerre froide ; le "tournant environnemental(iste)" des sciences de l'atmosphère dans les années 1970-80 ; la gouvernance du changement climatique.

Mots-clefs : chimie atmosphérique, environnement global, couche d'ozone, changement climatique, science du système Terre, expertise, associations et conflits disciplinaires, crise environnementale, géoingénierie, ODP et GWP, gaz à effet de serre de courte durée de vie

Title : A HISTORY OF CHEMISTRY OF THE GLOBAL ATMOSPHERE. Expertise and disciplinary aspects in the ozone layer and climate change case studies

Summary :
Until now, the history of environmental sciences has not extensively documented the input of *atmospheric chemists*, who formalize the chemical reactions that take place in the atmosphere. This PhD dissertation focuses on chemistry of the *global* atmosphere. Atmospheric chemistry has been in the heart of the expertise on the anthropogenic destruction of the ozone layer from 1970 on. Since the end of the 1980s, atmospheric chemists have also taken part in the writing of the *IPCC* reports. They have also contributed to the more holistic works on the "Earth system". Combining different approaches for studying sciences and techniques, this PhD dissertation writes a "social" history of the academic field on chemistry of the global atmosphere since the 1920s. Our narrative is mainly focused on the evolution of the scientific practices of chemistry of the global atmosphere, on social and disciplinary changes, and on the new types of expertise that have emerged within the field. The author mainly concentrates on three "moments": the first two decades of the Cold war; the "environmental(ist) turn" of atmospheric sciences in the 1970s and 80s; the climate change governance.

Keywords : Atmospheric chemistry, global environment, ozone, climate change, Earth system science, expertise, disciplinary associations and conflicts, environmental crisis, geoengineering, ODP and GWP, short-lived greenhouse gases