



HAL
open science

Le GIEC, une dialectique science et politique. De la quantophrénie et de l'imprévisible

Marc Delepoue

► **To cite this version:**

Marc Delepoue. Le GIEC, une dialectique science et politique. De la quantophrénie et de l'imprévisible. Philosophie. HESAM Université, 2023. Français. NNT: 2023HESAC009. tel-04166748

HAL Id: tel-04166748

<https://theses.hal.science/tel-04166748v1>

Submitted on 20 Jul 2023

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 DOCTORALE ABBÉ GRÉGOIRE
Laboratoire HT2S

THÈSE

présentée par : **Marc DELEPOUVE**

soutenue le : **20 juin 2023**

pour obtenir le grade de : **Docteur d'HESAM Université**

préparée au : **Conservatoire national des arts et métiers**

Discipline : **Épistémologie, histoire des sciences et des techniques**

Spécialité : **Sciences, techniques et société**

Le GIEC, une dialectique science et politique **De la quantophrénie et de l'imprévisible**

THÈSE dirigée par : M. BOCQUET Bertrand

et co-dirigée par : M. RUANO-BORBALAN Jean-Claude

Jury,

M. Smaïl AÏT EL HADJ, Professeur des universités, ITECH Lyon, Rapporteur

M. Frédéric CAILLE, Maître de conférences HDR, Laboratoire Triangle CNRS/ENS de Lyon, Université de Savoie, Rapporteur

Mme Kari DE PRYCK, Maîtresse assistante, Institute for Environmental Sciences (ISE), Université de Genève, Examinatrice

M. Vincent DEVICTOR, Directeur de recherche, CNRS, Institut des Sciences de l'Évolution de Montpellier, Examineur

M. Philippe DURANCE, Professeur au Conservatoire national des arts et métiers, Examineur

Mme Janine GUESPIN-MICHEL, Professeure honoraire, Université de Rouen Normandie, Examinatrice

1

Je soussigné, Marc Delepoue, déclare par la présente que le travail présenté dans ce manuscrit est mon propre travail, réalisé sous la direction scientifique de Bertrand Bocquet (directeur) et de Jean-Claude Ruano-Borbalan (co-directeur), dans le respect des principes d'honnêteté, d'intégrité et de responsabilité inhérents à la mission de recherche. Les travaux de recherche et la rédaction de ce manuscrit ont été réalisés dans le respect de la charte nationale de déontologie des métiers de la recherche.

Ce travail n'a pas été précédemment soumis en France ou à l'étranger dans une version identique ou similaire à un organisme examinateur.

Fait à Paris, le 22 mars 2023

Signature

Marc Delepoue

Affidavit

I, undersigned, Marc Delepoue, hereby declare that the work presented in this manuscript is my own work, carried out under the scientific direction of Bertrand Bocquet (thesis director) and of Jean-Claude Ruano-Borbalan (co-thesis director), in accordance with the principles of honesty, integrity and responsibility inherent to the research mission. The research work and the writing of this manuscript have been carried out in compliance with the French charter for Research Integrity.

This work has not been submitted previously either in France or abroad in the same or in a similar version to any other examination body.

Paris, 22th March 2023

Signature

Marc Delepoue

Je dédie ma thèse à Valérie Masson Delmotte, en reconnaissance de la hauteur de sa contribution à la mobilisation internationale face au changement climatique.

Remerciements

Je remercie vivement Bertrand Bocquet, mon directeur de thèse, pour sa grande disponibilité et son suivi soutenu. Je le remercie de m'avoir permis, dès 2013, de rejoindre la recherche académique à l'Université de Lille 1, puis d'avoir contribué à mon intégration au laboratoire HT2S du CNAM, alors dirigé par Jean-Claude Ruano-Borbalan, mon co-directeur de thèse. Je les remercie chaleureusement tous les deux de m'avoir invité à entamer un parcours doctoral, en 2016, puis de m'avoir accompagné tout au long des six années où, à côté de mon enseignement, des mes engagements et des aléas de la vie, il a fallu tenir la distance. Je les remercie vivement de leurs conseils et de leur transmission de savoir, de leur exigence et de leur hauteur d'esprit.

Je remercie Amy Dahan et Philippe Durance, membres de mon comité de thèse, pour leur perspicacité et les prises de recul qu'ils m'ont permis de prendre, et pour leurs conseils, en particulier celui de développer des outils et des recommandations à destination du politique ou encore de présenter la genèse de ma recherche.

Je remercie Valérie Lilette pour son esprit critique et son sens de l'essentiel, et pour, au quotidien, son soutien et la richesse de nos échanges. Un grand merci de m'avoir motivé à approfondir l'exploration du rôle du vivant dans l'histoire du système Terre, de là ont émergé la notion de système bio-Terre, puis celle d'éon Anthropozoïque.

Un grand remerciement à Gilles Ramstein. À propos du manuscrit de l'annexe 1, *Bifurcation vers l'éon Anthropozoïque*, ses corrections, questions et suggestions et son soutien ont été précieux.

Merci à Janine Guespin et Anne-Frédérique Paul Antoine, de leur vivacité d'esprit, de leur profond engagement pour la pensée du complexe, de leur soutien depuis de nombreuses années et enfin de leur contribution cruciale dans l'approfondissement de mes connaissances en biologie.

Merci à Pascale Braconnot, Philippe Dubuisson et Hellène Guillemot. Les entretiens qu'ils m'ont accordés m'ont permis de conforter des axes majeurs de ma thèse.

Merci à Loïc Petitgirard, Directeur du laboratoire HT2S, qui a toujours pris le temps d'apporter des réponses riches et fournies à mes questions relatives à l'histoire des sciences.

Merci à Margaux Delepouve et Michelle Olivier pour la sagacité de leur relecture. Merci à Edgar Blaustein, pour la relecture stimulante de l'annexe 1.

Enfin, mes remerciements vont à l'ensemble des collègues du laboratoire HT2S, pour l'ambiance chaleureuse et coopérative et la qualité des échanges.

Cette thèse a été préparée avec le soutien de l'Université de Lille sous la forme d'une décharge d'enseignement à mi-temps accordée durant quatre années dans le cadre de la convention de partenariat de recherche avec le CNAM.

Résumé

Notre thèse explore la question de la prise en compte de l'imprévisible dans les rapports du GIEC, dans sa communication 'à l'intention des décideurs' et finalement dans l'élaboration des politiques climatiques.

Nous y donnons à voir l'émergence et le développement d'une dynamique internationale science et politique relative au changement climatique, dans laquelle le GIEC est rapidement devenu l'acteur central. Nos travaux sont centrés sur le croisement de cette dynamique avec la tension entre la quantophrénie (tendance à ne prendre en considération que ce qui est quantifié) et l'imprévisible. En particulier, nous avons observé cette tension dans l'utilisation des résultats de la modélisation climatique portant sur le futur et, corrélativement, dans l'utilisation des scénarios climatiques pour le XXI^e siècle, notamment lors de leur traduction en objectifs politiques. *In fine*, nous constatons la diffusion d'une sous-estimation du risque climatique sur la base de laquelle sont définis des objectifs politiques, en raison de l'absence de prise en compte de l'imprévisible.

Enfin, nous introduisons un concept épistémologique inédit, le *Reste causal*, outil d'une conception renouvelée de l'expertise scientifique et plus largement du triptyque science, expertise et politique. L'objectif est notamment de prendre pleinement en compte l'imprévisible dans la stratégie politique. Le *Reste causal* est un complément associé à une représentation de l'évolution d'un phénomène donné. Il rassemble les phénomènes qui influencent cette évolution, mais qui ne sont pas pris en compte dans cette représentation.

Par ailleurs, l'annexe 1 montre qu'actuellement le système Terre bifurque non pas seulement vers une nouvelle époque géologique, l'Anthropocène, mais plutôt vers un nouvel éon, le 5^e de l'histoire de notre planète, que nous nommons Anthropozoïque. Il s'en dégage une approche renouvelée de la place des humains dans l'histoire du Système Terre. En particulier, nous illustrons de plusieurs manières la sortie de la période géologique du Quaternaire et en tirons des conséquences sur le niveau de fiabilité des modèles climatiques, dès lors que les résultats portent sur le futur.

Notre thèse comporte trois études de cas. Chacune a son objet au croisement de la dynamique science et politique et de la tension entre quantophrénie et imprévisible, et chacune montre comment une quantification peut contribuer à une représentation atténuée d'un risque.

- La première porte sur un objet politique quantophrénique qui masque l'imprévisible, à savoir le *facteur 2*, c'est-à-dire la réduction de 50 % des émissions de Gaz à effet de serre (GES) à l'horizon 2050. Dans les années 2000 et jusqu'à récemment, ce facteur a connu une certaine appropriation dans les pays du G8. Son étude apporte un éclairage sur la dialectique entre science et politique qui s'exerce au sein du GIEC, ainsi que sur un usage politique abusif de référence au GIEC.

- La deuxième porte sur quatre sources naturelles de méthane dont les émissions durant le XXI^e siècle sont largement imprévisibles et non quantifiables, mais risquent de contribuer à un emballement du réchauffement climatique. Notre thèse présente ce que la production de recherche et les rapports du GIEC disent sur ce sujet, et constate l'absence totale de prise en compte de ces émissions, au moins jusqu'au 5^e RE, par les scénarios du GIEC.

- La troisième porte sur la place accordée à l'imprévisible et au *Reste causal* associé aux scénarios, dans les *Résumés à l'intention des décideurs* des différents Rapports d'évaluation (RE) du GIEC, du 1^{er} RE (1990) au 6^e et dernier RE (2021). Cette étude éclaire en particulier la mission politique du GIEC.

Pour finir, notre thèse apporte une vision renforcée de l'urgente nécessité de réduire les émissions de méthane et, par ailleurs, fournit une quantité de questions et de nombreux matériaux pour une variété de projets et de programmes de recherche.

Mots clés : GIEC ; Imprévisible ; Quantophrénie ; Scénario climatique ; Méthane ; Système Terre

English Summary

Our thesis explores the question of how the unpredictable is taken into account in the IPCC's reports, in its communication 'to decision-makers' and ultimately in climate policy-making.

We show the emergence and development of an international science-policy dynamic on climate change, in which the IPCC has rapidly become the central actor. Our work focuses on the intersection of this dynamic with the tension between quantophobia (the tendency to take into consideration only what is quantified) and the unpredictable. In particular, we have observed this tension in the use of climate modelling results concerning the future, and correlatively in the use of climate scenarios for the 21st century, especially when translating them into political objectives. In the end, we note the spread of an underestimation of climate risk on the basis of which political objectives are defined, due to the lack of consideration of the unpredictable.

Finally, we introduce a new epistemological concept, the *Causal Remainder*, a tool for a renewed conception of scientific expertise and, more broadly, of the triptych of science, expertise and policy. The aim is to take the unpredictable fully into account in political strategy. A *Causal Remainder* is a complement associated with a representation of the evolution of a given phenomenon. It brings together the phenomena that influence this evolution, but which are not taken into account by this representation.

Furthermore, Appendix 1 shows that the Earth system is currently bifurcating not only towards a new geological epoch, the Anthropocene, but rather towards a new eon, the fifth in the history of our planet, which we call the Anthropozoic. The result is a renewed approach to the place of humans in the history of the Earth System. In addition, we illustrate in several ways the exit from the Quaternary geological period and draw consequences on the level of reliability of climate models, when the results concern the future.

Our thesis includes three case studies. Each has its object at the intersection of science-policy dynamics and the tension between quantophobia and unpredictability, and each shows how quantification can contribute to a mitigated representation of a risk.

- The first deals with a quantophobic political object that masks the unpredictable, namely Factor 2, i.e. the 50% reduction in greenhouse gas (GHG) emissions by 2050. In the 2000s and until recently, this factor has enjoyed a certain appropriation in the G8 countries. His study sheds light on the dialectic between science and politics within the IPCC, as well as on the political misuse of references to the IPCC.

- The second focuses on four natural sources of methane whose emissions during the 21st century are largely unpredictable and unquantifiable, but may contribute to runaway global warming. Our thesis presents what the research output and the IPCC's reports say on this subject, and notes the total failure of the IPCC's scenarios to take these emissions into account.

- The third study examines the place given to the unpredictable and the causal residual associated with the scenarios, in the Summaries for Policymakers of the various IPCC Assessment Reports (ARs), from the first AR (1990) to the sixth and final AR (2021). In particular, this study sheds light on the political mission of the IPCC.

Finally, our thesis provides a strengthened view of the urgent need to reduce methane emissions and, at the same time, provides a wealth of questions and material for a variety of research projects and programmes.

Key Words: IPCC ; Unpredictable; Quantophobia; Climate scenario; Methane; Earth system

Sommaire

INTRODUCTION.....	22
PREMIÈRE PARTIE <i>Les contextes</i>	43
Chapitre 1 – Genèse d’une question scientifique et politique.....	44
Chapitre 2 – La bifurcation du système Terre : une imprévisibilité renforcée.....	66
Chapitre 3 – L’imprévisible : de l’enchantement et de la quantophrénie.....	78
Conclusion : Une disjonction entre représentations et phénomènes représentés.....	89
DEUXIÈME PARTIE <i>L’institution</i>	91
Chapitre 1 - Présentation du GIEC, du mode de rédaction des rapports et du rôle des politiques.....	92
Chapitre 2 - Les scénarios climatiques.....	110
Chapitre 3 - Une contribution politique historique.....	141
Contribution épistémologique, le concept de <i>Reste causal</i>	164
TROISIÈME PARTIE <i>Études de cas</i>	168
Chapitre 1 - Science et politique : le <i>facteur 2</i>	170
Chapitre 2 – Méthane. Des émissions naturelles hors scénario.....	206
Chapitre 3 – Le <i>Reste causal</i> et la communication à « l’intention des décideurs » : Effacement ponctuel puis rebond.....	268
QUATRIÈME PARTIE <i>Interprétations et ouvertures</i>	285
Chapitre 1 - Le <i>Reste causal</i> , le quantifiable, l’imprévisible et le Principe de précaution.....	286
Chapitre 2 - Interactions entre politique, expertise et recherche.....	306
Chapitre 3 - Propositions de résumés alternatifs aux RID.....	316
Chapitre 4 - Prolongements et perspectives de recherche.....	322
CONCLUSION.....	330
Bibliographie.....	342
Annexe 1 : Bifurcation vers l’ <i>éon Anthropozoïque</i>	358
Annexe 2 : Réactivité du méthane et Inertie du dioxyde de carbone.....	405
Annexe 3 : Les scénarios du 6 ^e RE du GIEC.....	408
Annexe 4 : Champignons, l’effet boomerang.....	409
Annexe 5 : GIEC, un engagement de la France.....	411
Annexe 6 : les sigles.....	412

Table des matières

.....	2
INTRODUCTION.....	22
Problématique et intention.....	24
Quelques définitions.....	26
Corpus.....	28
Méthodologie, champs disciplinaires.....	28
Présentation du plan.....	34
PREMIÈRE PARTIE <i>Les contextes</i>	43
Chapitre 1 – Genèse d’une question scientifique et politique.....	44
I.1.1 - XVII ^e et XVIII ^e siècles : alertes locales et intuitions sans preuve scientifique.....	45
I.1.2 - De l’hypothèse de l’effet de serre atmosphérique à la découverte de Gaz à effet de serre.....	45
I.1.3 - Émergence et « retrait » scientifiques de l’hypothèse d’un futur réchauffement climatique d’origine anthropique.....	47
I.1.4 - Le retour de l’hypothèse.....	48
I.1.5 – Juillet 1979, Le Rapport Charney de l’Académie américaine des sciences.....	52
I.1.6 - 1987, première observation empirique de la corrélation taux de CO ₂ -température sur 160 000 ans.....	55
I.1.7 – De l’émergence d’une inscription politique au niveau international au protocole de Kyoto.....	56
I.1.7.1 – Les prémices.....	56
I.1.7.2 – Vers la création du GIEC.....	57
I.1.7.3 – GIEC ; CCNUCC ; Protocole de Kyoto.....	60
I.1.8 – Conclusion.....	64
Chapitre 2 – La bifurcation du système Terre : une imprévisibilité renforcée.....	66
I.2.1 – Présentation générale.....	66
I.2.2 - Hyper-complexité.....	68
I.2.3 – Hors du Quaternaire.....	68
I.2.3.1 – Quelques illustrations concrètes.....	69
I.2.3.1.1 – Les gaz à effet de serre.....	69
I.2.3.1.2 – Les sols continentaux.....	69
I.2.3.1.3 – Le système nuageux.....	70
I.2.3.1.4 – L’acidité des océans.....	70
I.2.3.1.5 – Le vivant.....	72
I.2.3.2 – Une dynamique de rétroactions inédite.....	72
Chapitre 3 – L’imprévisible : de l’enchantement et de la quantophrénie.....	78
I.3.1 – La quantophrénie.....	79
I.3.2 – L’Hypothèse Gaïa.....	81
I.3.3 - Géo-ingénierie.....	83
I.3.4 - Une collapsologie bien peu complexe.....	86
Conclusion : Une disjonction entre représentations et phénomènes représentés.....	89
DEUXIÈME PARTIE <i>L’institution</i>	91
Chapitre 1 - Présentation du GIEC, du mode de rédaction des rapports et du rôle des politiques.....	92
II.1.1 - La mission.....	93
II.1.2 - Les acteurs.....	95
II.1.3 - Les rapports.....	97
II.1.4 – La place du politique.....	101
II.1.4.1 – Approche générale.....	101
II.1.4.2 – CCNUCC : une demande politique adressée au GIEC.....	104
II.1.4.2.1 – Vers le lancement de la CCNUCC.....	104
II.1.4.2.2 - L’application de l’objet de la CCNUCC.....	105
II.1.4.3 – Planification.....	107
II.1.4.4 – Un appel du GIEC à prendre en considération la complexité.....	108
Chapitre 2 - Les scénarios climatiques.....	110

II.2.1 - Les différents profils.....	111
II.2.1.1 – Approche générale.....	111
II.2.1.2 – Des profils nouveaux qui réduisent les incertitudes.....	112
II.2.2 - Les modèles climatiques.....	114
II.2.2.1 - Généralités et limites.....	114
II.2.2.1.1 - Le regard d'une philosophe des sciences.....	114
II.2.2.1.2 – Une diversité de modèles.....	116
II.2.2.1.3 – Les modèles et le Programme mondial de recherche sur le climat.....	117
II.2.2.1.4 – Le regard d'un climatologue.....	118
II.2.2.1.5 - Ce qu'en disait le GIEC en 1990, puis en 1997.....	119
II.2.2.1.6 - Vingt et un ans plus tard : une insaisissable complexité.....	121
II.2.2.1.7 – Déglaciations passées, une approche des lois qui président au réchauffement actuel ?.....	122
II.2.2.2 - Du passé et du futur.....	124
II.2.2.2.1 – La modélisation et le mur du futur en situation de bifurcation.....	125
II.2.2.2.2 - À quatre et finalement trois temps.....	127
i - Le passé récent.....	127
ii - Le passé ancien.....	128
iii - Le futur.....	128
II.2.3 - La <i>moyenne démocratique</i>	131
II.2.3.1 – Définition et première analyse.....	131
II.2.3.2 – Le point de vue du GIEC.....	131
II.2.4 - La construction et la présentation des incertitudes et de l'estimation de la fiabilité des résultats.....	134
II.2.4.1 - La demande du politique.....	134
II.2.4.2 - Synthèse de ce qu'en dit le Résumé à l'intention des décideurs du GT1.....	135
II.2.4.3 - Précisions données dans le rapport complet du GT1.....	136
II.2.4.4 - Sensibilité climatique et regard porté sur l'improbable.....	137
II.2.4.5 – Les nuages, principale source d'incertitude des scénarios ? Oui mais.....	138
II.2.4.6 – Conclusion.....	140
Chapitre 3 - Une contribution politique historique.....	141
II.3.1 - Appropriation politique de la preuve scientifique.....	142
II.3.1.1 - 1 ^{er} RE, 1990.....	142
II.3.1.2 - 2 ^e RE, 1995.....	143
II.3.1.3 - 3 ^e RE, 2001.....	144
II.3.1.4 - 4 ^e RE, 2007.....	145
II.3.1.5 - 5 ^e RE, 2013.....	147
II.3.2 – La preuve par les modèles.....	148
II.3.3 - De la pleine reconnaissance scientifique à la pleine mobilisation politique ?.....	149
II.3.3.1 – Bilan de la mobilisation politique concrète.....	150
II.3.3.2 - Décembre 2015. L'Accord de Paris.....	152
II.3.3.3 - Octobre 2018. Rapport spécial sur un réchauffement planétaire de 1,5°C.....	154
II.3.3.4 – De l'expression du changement climatique devenue visible et de la mobilisation citoyenne et politique.....	155
II.3.3.5 - Une mobilisation et des objectifs nationaux déployés internationalement.....	158
II.3.3.6 – La mobilisation de la Chine.....	159
II.3.4 - Le leurre de la quantification.....	161
Contribution épistémologique, le concept de <i>Reste causal</i>	164
1 - Classification interne selon la nature de l'inconnu.....	164
2 - Singularité.....	166
TROISIÈME PARTIE <i>Études de cas</i>	168
Chapitre 1 - Science et politique : le <i>facteur 2</i>	170
III.1.1 - Chronologie d'une montée en puissance : rôle du GIEC, du G8, du gouvernement français et d'un scientifique français.....	171
III.1.1.1 – Présentations préliminaires.....	171
III.1.1.2 – 1990 : Premier rapport d'évaluation du GIEC.....	175
III.1.1.3 – 1995 : deuxième rapport d'évaluation du GIEC.....	176
III.1.1.4 - Interview de Jean Jouzel, « membre du GIEC », novembre 2000.....	176

III.1.1.5 - 2001 : 3 ^e rapport d'évaluation du GIEC.....	178
III.1.1.6 - Février 2003. Assemblée générale du GIEC. Paris. Allocution du Chef du gouvernement français.	180
III.1.1.7 - Juin 2003. <i>Stratégie nationale de développement durable</i> , Comité interministériel pour le développement durable.....	181
III.1.1.8 – 2004. Engagement du ministre de l'écologie et du développement durable.....	182
III.1.1.9 - 13 juillet 2005. LOI n° 2005-781 de programme fixant les orientations de la politique énergétique	185
III.1.1.10 - Juin-septembre 2007. Publication du 4 ^e Rapport d'évaluation du GIEC.....	185
III.1.1.11 - 8 juin 2007. Déclaration des chefs d'État et de gouvernement du G8 d'Heiligendamn.....	186
III.1.1.12 - 10 octobre 2007. Assemblée nationale. – Audition de Jean Jouzel.....	187
III.1.1.13 - 8 Juillet 2008. Déclaration des chefs d'État et de gouvernement du G8, Toyako.....	188
III.1.1.14 - 2013-2014. Publication du 5 ^e rapport d'évaluation du GIEC.....	189
III.1.1.15 - Octobre 2014, Jean Jouzel.....	191
III.1.1.16 - Loi n° 2015-992 du 17 août 2015 relative à la transition énergétique pour la croissance verte.	192
III.1.1.17 – L'abandon du facteur 2 au bénéfice de l'objectif de neutralité carbone.....	192
III.1.2 – Retour sur le 4 ^e rapport d'évaluation du GIEC.....	193
III.1.2.1 – Le Résumé technique du GT3.....	193
III.1.2.1.1 - Indispensable à quoi ?.....	194
III.1.2.1.2 - Quelques glissements et ambiguïtés sémantiques.....	194
III.1.2.2 - Le rapport intégral du GT3.....	196
III.1.2.4 - Conclusion.....	196
III.1.3 - Diffusion et légitimation dans l'espace public.....	197
III.1.3.1 - Wikipédia : légitimation par un raisonnement simple posé sur une question complexe.....	197
III.1.3.2 - La légitimation par des scientifiques.....	198
III.1.3.3 - La légitimation par des écologistes.....	201
III.1.4 - Quel impact politique ?.....	204
Chapitre 2 – Méthane. Des émissions naturelles hors scénario.....	206
III.2.1 – Généralités autour d'un puissant GES.....	207
III.2.1.1 – Un déterminant majeur du climat de l'éon Archéen.....	207
III.2.1.2 – Données atmosphériques d'un puissant GES.....	208
III.2.1.3 - Sortie des rails.....	209
III.2.1.4 - Poids du méthane dans le surplus anthropique de gaz à effet de serre.....	211
III.2.1.5 - Rebond inattendu.....	212
III.2.1.5.1 - Les sauts de 2020 et de 2021.....	212
III.2.1.5.2 – Depuis 2007.....	215
i. Un retour exponentiel.....	215
ii. Des causes incertaines.....	215
III.2.1.5.3 - Les incertitudes.....	217
III.2.1.5.4 - Synthèse.....	218
III.2.1.6 - 2014, un seuil climatique ?.....	219
III.2.2 - Les différentes sources d'émissions.....	224
III.2.2.1 - Les sources anthropiques.....	225
III.2.2.2 – Focus sur quatre sources naturelles contenues dans le <i>Reste causal</i>	225
III.2.3 – Feuille de route.....	228
III.2.4 - Le pergélisol.....	228
III.2.4.1 - Introduction.....	229
III.2.4.2 - Un potentiel colossal.....	230
III.2.4.2.1 – Selon le 5 ^e RE, contribution du GT1.....	230
a. Le dégel en cours et à venir.....	230
b. Des stocks de carbone considérables.....	230
c. Quelles estimations des émissions durant le XXI ^e siècle ?.....	231
III.2.4.2.2 – Hors GIEC, avant le 5 ^e RE.....	233
III.2.4.2.3 – Hors GIEC, après le 5 ^e RE.....	233
III.2.4.3 – Un futur non quantifiable.....	234
III.2.4.3.1 – Tout était dit dans le 5 ^e RE du GIEC.....	235

III.2.4.3.2 – Un rapport intégral qui édulcore le risque.....	236
III.2.4.3.3 – Les émissions actuelles sont elles-mêmes difficilement quantifiables.....	238
III.2.4.4 – Conclusion.....	240
III.2.5 – La fonte des glaciers polaires.....	240
III.2.5.1 - Avant le 5 ^e RE.....	240
III.2.5.2 – Après le 5 ^e RE.....	242
III.2.5.3 - Conclusion.....	244
III.2.6 - La modification des courants marins.....	245
III.2.6.1 - Selon le 5 ^e RE du GIEC.....	245
III.2.6.2 - Selon les scientifiques, avant la période de rédaction du 5 ^e RE : menace sur l’AMOC et le Gulf Stream.....	247
III.2.6.3 - Un apport scientifique majeur après la période de rédaction du 5 ^e RE.....	248
III.2.7 - Les hydrates de méthane des fonds marins.....	250
III.2.7.1 – Un risque majeur pour le XXI ^e siècle.....	250
III.2.7.2 – Une impossible quantification.....	253
III.2.7.2.1 - Approche générale.....	253
III.2.7.2.2 - Des estimations extrêmement diverses et beaucoup d’inconnus.....	254
III.2.8 - Le vivant marin méthanogène.....	256
III.2.8.1 – Une perturbation inédite.....	256
III.2.8.1.1 – Présentation générale.....	256
III.2.8.1.2 - Alerte sur la déstabilisation des écosystèmes marins.....	259
III.2.8.2 - Rapidité de l’adaptation du vivant unicellulaire.....	260
III.2.8.3 - Des bactéries méthanogènes.....	261
III.2.8.4 - Le poids de l’imprévisible.....	262
III.2.8.5 - Le silence du 5 ^e RE.....	264
III.2.9 – Conclusion : un risque imprévisible d’emballement et de « changement brusque ».....	265
Chapitre 3 – Le <i>Reste causal</i> et la communication à « l’intention des décideurs » : Effacement ponctuel puis rebond.....	268
III.3.1 - 1 ^{er} RE, 1990.....	268
III.3.1.1 - Le RID du GT1.....	268
III.3.1.2 – La version brève du RID.....	271
III.3.2 - 2 ^e RE, 1995.....	272
III.3.3 - 3 ^e RE, 2001.....	274
III.3.4 - 4 ^e RE, 2007.....	274
III.3.5 - 5 ^e RE, 2013-2014.....	275
III.3.6 - 6 ^e RE.....	275
III.3.6.1 – RID du GT1.....	275
III.3.6.2 – Une innovation, les 14 points principaux du RE.....	278
III.3.7 – Conclusion.....	278
III.3.8 - Interprétation et représentation des incertitudes, la rupture du 6 ^e RE.....	283
QUATRIÈME PARTIE <i>Interprétations et ouvertures</i>	285
Chapitre 1 - Le <i>Reste causal</i> , le quantifiable, l’imprévisible et le Principe de précaution.....	286
Préambule.....	286
IV.1.1. Considérations autour du <i>Reste</i>	287
IV.1.1.1 - Toute chose étant égale par ailleurs.....	288
IV.1.1.2 – L’ <i>empreinte écologique</i>	288
IV.1.1.3 - Lien avec la notion d’incertitude.....	294
IV.1.1.4 – Un pont entre science et politique.....	295
IV.1.1.4.1 – Approche quantifiée du futur d’un phénomène en évolution ou à venir et <i>Reste causal</i> associé sont indissociables.....	296
IV.1.1.4.2 – Le <i>Reste causal</i> et le Principe de précaution.....	296
IV.1.1.4.3 - Conclusion.....	298
IV.1.2 – Le Principe de précaution et le changement climatique.....	298
IV.1.2.1 – Anticiper le non quantifié, l’imprévisible.....	298
IV.1.2.2 - Définitions.....	300
IV.1.2.3 – De la version CCNUCC (1992) et de l’abandon actuel.....	301

IV.1.2.4 – Un processus stratégique.....	303
Chapitre 2 - Interactions entre politique, expertise et recherche.....	306
IV.2.1 – Une coconstruction science et politique au service d’une mobilisation politique.....	306
IV.2.2 – L’impact du GIEC sur la recherche : une normalisation, un cadre, une motivation politique.....	309
IV.2.2.1 – Approche générale.....	309
IV.2.2.2 – En France, le cadre normatif du GIEC.....	309
IV.2.2.3 – La <i>moyenne démocratique</i> , coopération et <i>pression</i> du GIEC.....	310
IV.2.2.4 – La motivation politique des climatologues et l’influence du politique sur la recherche.....	311
IV.2.2.5 – Des divergences discrètes au sein de la communauté des climatologues.....	312
IV.2.2.6 - Conclusion.....	314
IV.2.3 - Une dynamique science et société hors GIEC, le projet ESM2025.....	314
Chapitre 3 - Propositions de résumés alternatifs aux RID.....	316
IV.3.1 – D’autres outils que les scénarios du GIEC pour exposer les risques futurs.....	316
IV.3.2 – Première approche et quelques principes.....	317
IV.3.3 - Mode de rédaction et acteurs.....	319
IV.3.3.1 - Organismes ou institutions scientifiques indépendantes du politique et des lobbies.....	319
IV.3.3.2 - Conventions citoyennes.....	320
Chapitre 4 - Prolongements et perspectives de recherche.....	322
IV.4.1 – Mes perspectives de recherche.....	322
IV.4.1.1 – Le <i>Reste</i> . L’imprévisible. Repenser le triptyque science, expertise et politique.....	323
IV.4.1.2 - L’ <i>éon Anthropozoïque</i> : Une nouvelle narration de l’histoire humaine.....	325
IV.4.2. - Perspectives au-delà de mes propres recherches.....	326
IV.4.2.1 – Questionnements psycho-socio-politiques relatifs aux rapports du GIEC.....	326
IV.4.2.1.1 - Contradictions entre les savoirs.....	326
IV.4.2.1.2 - Traductions hâtives de savoirs scientifiques en savoirs d’expertise.....	327
IV.4.2.1.3 - L’absence du vivant marin méthanogène dans le 5 ^e RE du GIEC.....	328
IV.4.2.2 – Autres.....	328
IV.4.2.2.1 – À propos d’auteurs des rapports du GIEC.....	328
IV.4.2.2.2 – Depuis 2013, quelle expression des divergences entre climatologues ?.....	329
IV.4.2.2.3 – Quelles discontinuités entre savoirs dans les futurs rapports du GIEC ?.....	329
CONCLUSION.....	330
Épilogue.....	340
Bibliographie.....	342
Annexe 1 : Bifurcation vers l’ <i>éon Anthropozoïque</i>	358
Quel apport ?.....	360
Introduction.....	362
1 ^{ère} partie Le système bio-Terre.....	364
I. Influences et chocs externes.....	366
1. Les mouvements des continents.....	367
2. L’activité volcanique.....	371
3. L’érection des montagnes.....	372
4. Les comètes et les astéroïdes.....	372
5. L’activité solaire.....	372
6. Les variations de l’orbite de la Terre.....	373
II. Cycles climatiques du Quaternaire.....	375
III. bouleversement du climat.....	377
IV. Un système complexe.....	378
2 ^e partie L’ <i>éon Anthropozoïque</i>	380
I. Éons, ères, périodes.....	380
II. L’Hadéen et l’Archéen.....	380
1. Instabilité.....	380
2. Vers l’apparition du vivant.....	381
3. Le climat sous influence du vivant.....	381
4. Le premier stade du système bio-Terre.....	382
III. De l’Archéen au Protérozoïque.....	382
1. Le Grand événement d’oxygénation.....	382

2. La montée en puissance de l'oxygène.....	384
IV. Du Protérozoïque au Phanérozoïque.....	384
1. Une bifurcation d'une durée de 182 millions d'années.....	384
2. Nouveau stade du vivant, nouvel état du système bio-Terre, nouveau fonctionnement du climat.....	386
V. Du Phanérozoïque à l'Anthropozoïque ?.....	388
1. Les bifurcations entre éons.....	388
2. L'hypothèse de l'éon Anthropozoïque.....	389
3. Les premiers milles ans.....	391
4. La nouvelle composante du vivant.....	391
5. Fulgurance.....	392
3 ^e partie L'humanité.....	394
I. Obscurantisme scientifique et dé-complexification.....	394
II. XX ^e siècle, l'humanité a amorcé une métamorphose.....	396
III. Accélération.....	398
IV. Utopie.....	400
Bibliographie.....	402
Annexe 2 : Réactivité du méthane et Inertie du dioxyde de carbone.....	405
Annexe 3 : Les scénarios du 6 ^e RE du GIEC.....	408
Annexe 4 : Champignons, l'effet boomerang.....	409
Bibliographie.....	410
Annexe 5 : GIEC, un engagement de la France.....	411
Annexe 6 : les sigles.....	412

Liste des annexes

Annexe 1 : Bifurcation vers l'éon Anthropozoïque, Émergences et imprévisibilité

Annexe 2 : Réactivité du méthane et Inertie du dioxyde de carbone

Annexe 3 : Les scénarios du 6^e RE du GIEC

Annexe 4 : Champignons, l'effet boomerang

Annexe 5 : GIEC, un engagement de la France

Annexe 6 : Les sigles

Les citations ou extraits de documents rédigés en anglais sont présentés en français dans le texte de la thèse. Les traductions ont été réalisées grâce à la version gratuite du traducteur automatique DeepL, www.DeepL.com/Translator, et aux corrections de relecture par nos soins. Les versions originales en anglais sont données en note de bas de page.

INTRODUCTION

« L'intellectualisation et la rationalisation croissantes (...) signifient bien plutôt que nous savons ou que nous croyons qu'à chaque instant nous pourrions, pourvu seulement que nous le voulions, nous prouver qu'il n'existe en principe aucune puissance mystérieuse et imprévisible qui interfère dans le cours de la vie, bref que nous pourrions maîtriser toute chose par la prévision. Mais cela revient à désenchanter le monde. Il ne s'agit plus pour nous (...) de faire appel à des moyens magiques en vue de maîtriser les esprits ou de les implorer mais de recourir à la technique et à la prévision » (Max Weber, 1919, p.70).

« Contrairement à ce que l'on aurait pu penser il y a encore quelques décennies, le développement des sciences et des techniques n'a pas apporté avec lui plus de certitudes. Au contraire, d'une manière qui peut paraître paradoxale, il a engendré toujours plus d'incertitudes et le sentiment que ce que l'on ignore est plus important que ce que l'on sait. ». (Michel Callon, Pierre Lascoumes et Yannick Barthe, 2001).

« Les systèmes naturels sont reconnus comme dynamiques et complexes ; ceux qui impliquent des interactions avec l'humanité sont "émergents", et intègrent les propriétés de réflexion et de contradiction. La science appropriée à cette nouvelle condition sera basée sur les hypothèses d'imprévisibilité, de contrôle incomplet, et d'une pluralité de perspectives légitimes. ». (Silvio O. Funtowicz et Jerome R. Ravetz, 1993).

«Alors même que le puissant Niño de 2016 s'est dissipé, nous assistons aujourd'hui à d'autres bouleversements dans le monde que nous sommes bien en peine d'élucider: nous touchons ici

aux limites de notre savoir scientifique concernant le climat et nous avançons maintenant en territoire inconnu»¹. (David Carlson², 2017).

Les années 2000 ont vu se diffuser dans l'espace public français un objectif à atteindre pour faire face au changement climatique, un objectif quantifié : réduire d'un *facteur 2* les émissions mondiales de Gaz à effet de serre (GES) entre le début et le milieu du XXI^e siècle. Ce facteur se déclinait différemment selon les pays. Pour les nations industrialisées telles que la France, il se traduisait en un '*facteur 4*', sinon en un '*facteur 4 ou 5*'.

L'idée circulait selon laquelle l'objectif *facteur 2* était fixé par le GIEC. Cependant, nos connaissances scientifiques nous permettaient de savoir que cet objectif n'était pas fondé scientifiquement et que sa nature était politique. Dans le cadre de responsabilités militantes, nous étions amenés à nous exprimer sur le sujet. C'est pourquoi, en 2007, nous décidâmes d'explorer le nouveau et 4^e Rapport d'évaluation (RE) du GIEC, en quête de la source du *facteur 2*. Nous découvrîmes alors que ce *facteur 2* ne trouvait aucun fondement dans ce rapport, hormis éventuellement à travers une interprétation nettement biaisée d'éléments de ce rapport. Par ailleurs, nous constatâmes que les scénarios climatiques pour le XXI^e siècle exposés dans ce rapport ne prenaient pas en considération certains phénomènes aux évolutions hautement imprévisibles, bien qu'ils possèdent un potentiel d'amplification du réchauffement climatique particulièrement conséquent. Or, le résumé de ce rapport, qui était au centre de la communication du GIEC, n'informait pas sur ce biais des scénarios. Depuis lors, à côté de nos activités professionnelles et de nos engagements personnels, nous poursuivons une étude de la production des sciences du climat et des rapports du GIEC. Nous avons rédigé divers textes sur ces derniers, dont un chapitre

1 Extrait du Communiqué de presse de l'OMM, numéro 04/2017, *Nombreux records pulvérisés en 2016 dans le domaine du climat, avec des conséquences planétaires*, publié le 21 mars 2017.

<https://public.wmo.int/fr/medias/communiqu%C3%A9s-de-presse/nombreux-records-pulv%C3%A9ris%C3%A9s-en-2016-dans-le-domaine-du-climat-avec-des>

2 David Carlson s'exprimait en tant que Directeur du Programme mondial de recherche sur le climat.

d'un livre intitulé *Une société intoxiquée par les chiffres*, publié en 2011 chez l'Harmattan. Finalement, en septembre 2016 nous avons débuté la préparation de la présente thèse.

Problématique et intention

Le propos de Max Weber, tenu en 1919 et reproduit ci-dessus, constatait une opposition dichotomique entre un Monde enchanté par une ou des puissances mystérieuses et imprévisibles et un Monde désenchanté qui pouvait être intellectualisé, rationalisé, prévu, maîtrisé grâce à la puissance de la technique et du savoir humains. Ce propos du sociologue ne laissait, dans le *Monde désenchanté*, aucune place à l'inexplicable et au non maîtrisable ; comme si la perte de la croyance en un dieu mystérieux et tout puissant créait un vide que venait occuper la croyance en une humanité possédant le potentiel de devenir toute puissante. Depuis, un siècle s'est écoulé. La foi en la volonté d'une maîtrise généralisée grâce au « *recours à la technique et à la prévision* » est toujours d'actualité, et se combine avec le scientisme quantophrénique. Il en résulte une hypertrophie de la place et du rôle accordés aux approches quantifiées des phénomènes réels (Delepouve M., 2011 ; Supiot A., 2015) et, inversement, une atrophie de la place accordée à l'incertitude forte, au non connu et à l'imprévisible.

Nous avons constaté que les scénarios publiés dans le 4^e RE du GIEC, qui semblaient constituer une approche quantifiée du devenir du climat durant le XXI^e siècle, ne prenaient pas en considération des phénomènes largement imprévisibles pouvant impacter ce devenir. Cela nous a amené à la problématique de notre thèse : *Quelle prise en compte du non connu et de l'imprévisible dans l'élaboration des politiques climatiques ? Quel rôle du GIEC à cet égard et plus largement dans le triptyque science, expertise et politique relatif au changement climatique ?* Nous verrons que notre problématique s'entremêle avec de nombreuses questions que nous serons amené à explorer.

Nous appuierons notre étude sur trois contextes. Tout d'abord le contexte historique de l'émergence puis du développement du changement climatique en tant que question scientifique, puis, plus récemment, en tant que question politique. Ensuite le contexte géologique de la bifurcation en cours du système-Terre, lequel nous amènera à revisiter le concept d'Anthropocène et à pro-

poser une évaluation des résultats de la modélisation climatique relatifs au futur. Enfin le contexte quantophrénique.

Nous introduirons dans notre thèse une notion épistémologique inédite, le *Reste causal*³, présente tout au long de notre exposé et dont la portée heuristique potentielle dépasse largement le cadre du changement climatique. Cette notion est connexe à celles de *Reste* et de *Reste résultant*, tout aussi inédites, mais sur lesquelles nous ne nous appuyerons pas dans notre thèse. Le plus souvent, les modèles ne peuvent prétendre couvrir la totalité des aspects des objets ou phénomènes réels qu'ils ont vocation à approcher ; ils ignorent ainsi un ensemble d'aspects que nous appellerons le *Reste*. Il en va de même d'un ensemble d'impacts ou de conséquences de ces objets ou phénomènes, nous l'appellerons le *Reste résultant*. *Idem* pour un ensemble de phénomènes qui agissent sur ces objets ou phénomènes et en impactent les évolutions futures, nous l'appellerons le *Reste causal*. Ainsi, les modèles climatiques ne prennent pas en considération certains phénomènes pouvant ou devant influencer le changement climatique au cours du XXI^e siècle. Pour un modèle climatique donné, l'ensemble des phénomènes situés en amont mais non pris en compte constituent *Le Reste causal*. Notre thèse offrira l'opportunité d'utiliser, d'explorer et de tester ce nouvel outil qui, au-delà de la question du devenir du changement climatique, peut être appliqué à toute évolution et toute émergence d'un objet ou d'un phénomène.

Pour étayer notre propos, nous présenterons trois études de cas. La première portera sur le *facteur 2*, objectif politique abusivement présenté comme étant scientifiquement fondé et issu du GIEC. La deuxième portera sur les émissions de méthane durant le XXI^e siècle, plus précisément sur les émissions liées aux quatre phénomènes fortement chargés d'imprévisible suivants – le dégel du permafrost, la fonte d'hydrates de méthane marins, la fonte des glaciers polaires, le bouleversement du vivant marin. Elle portera, en outre, sur la place accordée à ces émissions dans la construction des scénarios climatiques publiés par le GIEC. La troisième portera sur les Résumés à l'intention des décideurs (RID) des Rapports d'évaluation successifs du Groupe de travail 1 (GT1) du GIEC, depuis la création du GIEC et jusqu'en 2021. Nous y observerons ce que le GIEC communique dans ces différents RID à propos de ces quatre sources d'émissions de méthane et plus largement à propos de l'imprévisible.

3 Le terme *Reste* m'a été proposé par le météorologue Sylvain Mondon, le 10 avril 2019, à l'occasion d'une formation à l'épistémologie de l'école doctorale Abbé Grégoire du CNAM.

Quelques définitions

Nous prenons pour définition du **climat** la version proposée en 2011 par Valérie Masson-Delmotte : « (...) *la météorologie, c'est la science du temps qu'il fait en un jour donné et en un lieu donné. (...). Le climat, c'est l'ensemble de la météorologie de l'ensemble de la planète intégrée sur une longue période de temps. Typiquement, les climatologies de référence sont construites à partir des moyennes des mesures météorologiques (températures, précipitations...) relevées sur une période de trente ans – ce sont les fameuses « normales saisonnières », définies en général à partir des moyennes établies sur la période 1971-2000. Les types de temps varient profondément d'un jour à l'autre, d'une saison à l'autre, d'une année à l'autre : considérer le climat sur une période de trente ans permet de décrire non pas uniquement les conditions moyennes, mais également la variabilité climatique propre à chaque région.* ». (V. Masson-Delmotte, 2011, p.18-19).

Nous appelons **système bio-Terre** l'ensemble constitué du Monde du vivant, de l'atmosphère (sa composition : gaz, aérosols, nuages), des océans (leur composition chimique, les courants marins, les fonds marins...), des sols continentaux (leur composition, l'albédo, l'humidité...) et du climat. Ces cinq domaines présentent des évolutions extrêmement liées, inséparables. Ils constituent un même système. Au sein de ce dernier, d'innombrables interactions s'expriment et se traduisent par une évolution sans fin du système pris dans son ensemble. Enfin, l'histoire de ce système est constituée de stades d'évolution lente, entrecoupés de moments de basculement appelés bifurcations. L'étude de ce système est l'objet de notre Annexe 1.

La **neutralité carbone** d'une aire géographique donnée signifie que, sur cette aire, les émissions anthropiques de Gaz à effet de serre (GES) dans l'atmosphère sont égales, en quantité,

aux extractions anthropiques de GES de l'atmosphère. Cette notion est assez fréquemment utilisée avec une portée restreinte au seul CO₂. La neutralité carbone vers 2050 est un objectif fixé par un nombre croissant d'États et d'institutions interétatiques (Royaume-Uni, États-Unis, Union européenne...) qui, pour ce faire, s'appuient sur le rapport spécial sur un Réchauffement planétaire de 1,5°C adopté par le GIEC le 8 octobre 2018, rapport qui lui-même répondait à une commande politique de la COP21 tenue à Paris en 2015⁴. En juin 2021, le G7 a adopté l'objectif de neutralité carbone à atteindre en 2050⁵.

Nous appelons **sphère politique** l'ensemble des acteurs du champ politique ainsi que l'ensemble des enjeux, motivations, croyances, finalités, projets et programmes politiques. Une motivation politique chez un chercheur se situe donc dans la sphère politique.

Nous appelons **quantophrénie** la tendance à limiter les représentations des phénomènes ou des objets aux seules représentations quantifiées, à nourrir les processus de décision politique de ces seules représentations quantifiées, et à largement utiliser des critères quantitatifs comme outil de la mise en œuvre et de l'évaluation des politiques. La quantophrénie est une notion que nous trouvons dans les domaines des sciences, de l'expertise et de la politique.

Dans le cadre de notre thèse, sauf indication contraire, nous prenons pour définition du **Principe de précaution** l'énoncé de ce dernier issu du préambule de la Constitution de la République française « *Lorsque la réalisation d'un dommage, bien qu'incertaine en l'état des connaissances scientifiques, pourrait affecter de manière grave et irréversible l'environnement, les autorités publiques veillent, par application du principe de précaution et dans leurs domaines d'attributions, à la mise en œuvre de procédures d'évaluation des risques et à l'adoption de mesures provisoires et proportionnées afin de parer à la réalisation du*

4 Voir le RID, page 51, de ce Rapport spécial :

https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/sites/2/2019/09/SR15_Summary_Volume_french.pdf

5 <https://www.consilium.europa.eu/media/50361/carbis-bay-g7-summit-communique.pdf>

dommage. ». Cet énoncé restreint l'application de ce principe au seul domaine de l'environnement et ne couvre pas, contrairement à d'autres définitions, le domaine sanitaire. De plus, dans le cadre de nos travaux, nous apportons une seconde restriction, celle d'une application aux seules questions environnementales globales ; lesquelles appellent, néanmoins, un engagement et des mesures de la part de l'ensemble des autorités publiques, du niveau local à l'échelle internationale.

Le Principe de précaution est l'objet de controverses, portant notamment sur son application aux innovations. Dans le même temps, l'application du Principe de précaution requiert des innovations techniques, sociales et institutionnelles, ce qu'illustre la création du GIEC en 1988. Enfin, nous notons que la décision d'appliquer ou non ce principe relève exclusivement de la sphère politique, et n'est aucunement de la compétence des scientifiques.

Corpus

Pour l'essentiel, notre recherche est fondée sur :

- des articles de recherche et des ouvrages de chercheurs des domaines des sciences naturelles, de la sociologie et de l'histoire des sciences, des Science and Technology Studies (STS) ou encore des sciences politiques ;
- les rapports du GIEC, notamment le 5^e RE (2013-2014), le site du GIEC, des documents et sites officiels, des communications gouvernementales et celles d'autres acteurs institutionnels.

En outre, nous avons participé à de nombreux colloques et séminaires, lieux de témoignages d'experts auteurs et de membres du bureau du GIEC, et lieux d'échanges avec ces derniers.

Méthodologie, champs disciplinaires

Notre thèse, dont l'objet est transdisciplinaire, croise plusieurs champs disciplinaires dont elle se nourrit et auxquels, dans sa modeste mesure, elle contribue.

Tout d'abord, il y a le champ de la science post-normale et de l'assurance qualité de l'information scientifique. La science post-normale est définie par Silvio O. Funtowicz et Jerome R. Ravetz dans les termes suivants : « *L'une des façons de distinguer les différents types de recherche est de considérer leurs objectifs : la science appliquée est " orientée vers la mission ", le conseil professionnel est " au service du client " et la science post-normale est " orientée vers les problèmes ". Ces trois types de recherche peuvent être mis en contraste avec le cœur de la science traditionnelle, " pure " ou " fondamentale ", laquelle est " motivée par la curiosité ". Dans le domaine de la science post-normale, les problèmes d'assurance qualité de l'information scientifique sont aigus et leur résolution exige de nouvelles conceptions de la méthodologie scientifique. » (Funtowicz S.O. et Ravetz J.R., 1993, p.740), (VOA⁶).*

A propos de l'assurance qualité de l'information scientifique, les deux auteurs précisent : « *Maintenant que les questions politiques liées aux risques et à l'environnement posent les problèmes les plus urgents à la science, l'incertitude et la qualité quittent la périphérie, on pourrait dire l'ombre, de la méthodologie scientifique pour devenir des concepts centraux et intégrateurs. Jusqu'à présent, elles ont été maintenues en marge de la compréhension de la science, tant pour les profanes que pour les scientifiques. Un nouveau rôle pour les scientifiques sera la gestion de ces incertitudes cruciales ; c'est là que se situe la tâche de l'assurance qualité de l'information scientifique fournie pour les décisions politiques. » (p. 742) (VOA⁷).*

Nous sommes là au cœur de notre thèse. Quelle est l'importance des incertitudes cruciales associées à la connaissance scientifique relative aux changements climatiques durant le XXI^e siècle ? Et comment gérer ces incertitudes ? Nous avons vu que ces questions se sont imposées à nous en 2007, lors d'une première exploration du 4^e RE du GIEC, motivée par une recherche

6 « *One way of distinguishing among the different sorts of research is by their goals: applied science is 'mission-oriented'; professional consultancy is 'client-serving'; and post-normal science is 'issue-driven'. These three can be contrasted with core science-the traditional 'pure' or 'basic' research-which is 'curiosity-motivated'. In the area of post-normal science the problems of quality assurance of scientific information are particularly acute, and their resolution requires new conceptions of scientific methodology. »*

7 « *Now that the policy issues of risk and the environment present the most urgent problems for science, uncertainty and quality are moving in from the periphery, one might say the shadows, of scientific methodology, to become the central, integrating concepts. Hitherto they have been kept at the margin of the understanding of science, for laypersons and scientists alike. A new role for scientists will involve the management of these crucial uncertainties; therein lies the task of quality assurance of the scientific information provided for policy decisions. »*

relative au *facteur 2*, elle-même motivée par notre volonté de coller au mieux à la réalité du changement climatique.

Bien sûr, ces questions étaient déjà, et sont toujours, l'objet de travaux de recherche institutionnels. Il faut notamment citer l'article d'Oppenheimer et al., *The Limits of Consensus*, publié par la revue *Science*, en cette même année 2007. En voici un extrait : « *Mettre de côté ou minimiser l'importance d'incertitudes structurelles clés dans les processus sous-jacents est un résultat fréquent de la recherche du consensus. Par exemple, les fourchettes de réchauffement et de composition atmosphérique prévues dans le quatrième rapport d'évaluation comprennent un effet amplificateur des interactions entre le climat et le cycle du carbone. Cependant, l'incertitude estimée de cet effet est basée en grande partie sur des modèles qui omettent un certain nombre de processus mal compris, tels que les rétroactions du carbone contenu dans le pergélisol, les changements dans la structure des écosystèmes marins, les réponses à l'histoire de l'utilisation des terres, la limitation des nutriments et les effets de la pollution atmosphérique.* ». (Oppenheimer et al., 2007, p.1505). (VOA⁸).

Six ans plus tard, en 2013, un article de Brysse et al. présentait une approche relative aux normes de la culture et de la méthode des scientifiques : « *Les preuves disponibles suggèrent que les scientifiques ont en fait été conservateurs dans leurs projections des impacts du changement climatique. En particulier, nous discutons des études récentes montrant qu'au moins certaines des propriétés clés du réchauffement climatique dû à l'augmentation des gaz à effet de serre dans l'atmosphère ont été sous-estimées, notamment dans les évaluations des sciences physiques du GIEC, par le groupe de travail I. Nous notons également la manifestation moins fréquente d'une sur-prédiction des caractéristiques clés du climat dans ces évaluations. Nous suggérons donc que les scientifiques ne sont pas enclins à l'alarmisme mais plutôt à l'inverse (...). Nous appelons cette tendance "erring on the side of least drama (ESLD)". Nous suggérons quelques causes possibles de ce biais directionnel, notamment l'adhésion aux normes scienti-*

8 “Setting aside or minimizing the importance of key structural uncertainties in underlying processes is a frequent outcome of the drive for consensus. For example, ranges of projected warming and atmospheric composition on AR4 include an amplifying effect of interactions between climate and the carbon cycle. However, the estimated uncertainty in this effect is based largely on models that omit a number of poorly understood processes, such as feedbacks on carbon contained un permafrost; changes in marine ecosystem structure; and responses to land-use history, nutrient limitation, and air-pollution effects.”

fiques de retenue, d'objectivité, de scepticisme, de rationalité, d'absence de passion et de modération.” (Brysse et al., 2013, p327). (VOA⁹).

Pour être complet et ne pas suggérer que la question de ce ‘biais directionnel’ relève au sein du GIEC des seuls scientifiques, il nous faut noter que le consensus au sein de cette institution intergouvernementale, dont parlent ci-dessus Oppenheimer et al., est un consensus politico-scientifique. Consensus à propos duquel dans ce même article, en 2007, Oppenheimer et al. alertaient sur le contenu quantifié qui mettait sur le côté ou minimisait des ‘possibilités plus extrêmes’ et négligeait donc le niveau d’imprévisibilité du futur du changement climatique : *« l'importance accordée au consensus dans les rapports du GIEC a toutefois mis l'accent sur les résultats attendus, qui sont ensuite ancrés par des estimations numériques dans l'esprit des décideurs politiques. (...) il est désormais également important que les décideurs comprennent les possibilités plus extrêmes que le consensus peut exclure ou minimiser. »*. (Oppenheimer et al., 2007, p 1505). (VOA¹⁰). Enfin, la nature politico-scientifique de la production du GIEC, et en particulier du traitement des incertitudes, repose sur une dialectique science et politique qui s’exprime au sein de cette institution. En voici une présentation de O’Reilly, Oreskes et Oppenheimer : *« Au sein du GIEC, les auteurs (scientifiques), les délégués (politiques) et les employés du GIEC utilisent des stratégies de gestion issues à la fois de la diplomatie internationale et de la pratique scientifique pour créer chaque rapport d'évaluation, utilisant une gestion hybride pour faire face aux complexités de la recherche et de l'élaboration des politiques dans la gouvernance internationale. L'hybridation des régimes puissants de la politique internationale et de la science exige cependant une traduction importante entre les compréhensions sub-*

9 *« The available evidence suggests that scientists have in fact been conservative in their projections of the impacts of climate change. In particular, we discuss recent studies showing that at least some of the key attributes of global warming from increased atmospheric greenhouse gases have been under-predicted, particularly in IPCC assessments of the physical science, by Working Group I. We also note the less frequent manifestation of over-prediction of key characteristics of climate in such assessments. We suggest, therefore, that scientists are biased not toward alarmism but rather the reverse. We call this tendency “erring on the side of least drama (ESLD).” We suggest some possible causes of this directional bias, including adherence to the scientific norms of restraint, objectivity, skepticism, rationality, dispassion, and moderation. »*

10 *« The emphasis on consensus in IPCC reports, however, has put the spotlight on expected outcomes, which then become anchored via numerical estimates in the minds of policy-makers. (...) it is now equally important that policy-makers understand the more extreme possibilities that consensus may exclude or downplay. »*

jectives et contingentes de chacun. Une telle hybridation relève également de la "diplomatie scientifique", où l'information scientifique est appliquée à des objectifs politiques ». (O'Reilly et al., 2012). (VOA¹¹).

En vue d'apporter notre contribution à l'étude de l'importance et de la gestion des incertitudes cruciales relatives au futur du changement climatique, notre méthode relève de l'herméneutique et de la mise en intelligibilité d'un certain nombre d'ensembles de données issues de notre corpus exposé plus haut. Mettre en regard des connaissances scientifiques, bien souvent issues de disciplines éloignées, des données diverses, éventuellement chiffrées ; les classer, les relier, les assembler, les organiser rationnellement, les synthétiser ; telle est notre démarche. En particulier, il s'agit de rendre visibles des physionomies spatio-temporelles composées d'expressions de phénomènes et d'interactions entre ces derniers. Pour ce faire, nous faisons appel à des raisonnements logiques de type mathématique, mais aussi à des concepts et structures de la pensée du complexe (Guespin-Michel, 2015) ou encore plus simplement à des calculs chiffrés. De là, nous apportons un éclairage nouveau ou enrichi sur un certain nombre de questions. C'est, par exemple, le cas de notre annexe 1, *Bifurcation vers l'éon Anthropozoïque*, où se dégage une physionomie de l'histoire du système Terre et du vivant, et, de là, une nouvelle approche de la place de l'humanité dans cette histoire ; approche qui contribue à ce que Mireille Delmas-Marty nomme une 'refondation anthropologique'¹². C'est aussi le cas de notre thèse prise dans son ensemble, laquelle croise des synthèses de données du domaine des SN (voir en particulier le chapitre III.2 – Des émissions naturelles de méthane hors des scénarios) avec des contenus et aspects des rapports complets du GIEC, avec l'évolution depuis la création du GIEC des Résumés

11 « *Within the IPCC, authors, delegates, and IPCC employees use management strategies from both international diplomacy and scientific practice to create each assessment report, using hybrid management to deal with the complexities of research and policy-making in international governance. Hybridizing the powerful regimes of international policy and science, though, requires significant translation between the subjective and contingent understandings of each. Such hybridization also falls under the mantle of 'science diplomacy', where scientific information is applied to policy goals.* »

12 Voir Mireille Delmas-Marty, *Le changement climatique, une chance pour l'humanité ?* Texte de la communication au Colloque « Face au changement climatique, le champ des possibles » organisé par l'Académie des sciences les 28 et 29 janvier 2020. <file:///home/marc/Bureau/Le-changement-climatique-chance-pour-lhumanit%C3%A9.pdf>

à l'intention des décideurs, et finalement avec l'observation de la montée en puissance du processus de mobilisation politique.

Les mathématiques proprement dites sont convoquées pour proposer de nouvelles interprétations de données chiffrées présentées dans les rapports du GIEC ou dans des articles de recherche, dont notamment de nouvelles interprétations des incertitudes. Elles le sont aussi pour mettre en regard entre elles des données chiffrées du GIEC ou/et des SN, éventuellement après avoir réalisé certains calculs. Notre thèse est, en outre, pour partie fondée sur une analyse critique de l'utilisation du langage et des concepts des mathématiques dans les travaux d'élaboration des scénarios climatiques pour le XXI^e siècle publiés par le GIEC. Nous mettons en évidence les limites et biais de ces scénarios et les limites et biais des intervalles de confiance associés à ces scénarios. Enfin, nous proposons des interprétations des scénarios du GIEC et des intervalles de confiance associés, puis nous proposons des règles ou principes devant s'appliquer à leur communication et plus largement aux résultats d'études quantifiées.

Si notre thèse se situe dans le champ de la science post-normale et de l'assurance qualité de l'information scientifique, elle se situe dans le même temps dans le domaine des STS, avec une dominante Science et politique. Ici l'apport propre de la thèse est d'abord constitué de connaissances sur la construction et la nature d'un savoir d'expertise scientifique, ou plus exactement de deux savoirs d'expertise scientifique différents – celui des rapports complets du GIEC (plus particulièrement de la contribution du GT1) et celui des Résumés à l'intention des décideurs de ces rapports. Ensuite, cet apport est constitué de connaissances sur les distances ou différences entre ces différents savoirs experts, puis entre ces derniers et la production de la recherche en Sciences naturelles (SN) dont ils sont issus et dont ils proposent un bilan.

Enfin, il y a un apport de connaissances sur l'utilisation de ces savoirs experts par les responsables politiques avec, inversement, l'influence du politique ou de la motivation politique sur la construction et la nature de ces savoirs experts et, corrélativement, sur la construction et la nature des savoirs des SN.

Un des apports principaux de notre thèse est épistémologique et conceptuel. En particulier nous introduisons le concept de *Reste causal*, outil du triptyque science, expertise et politique dont le potentiel se présente au plan de la construction et de l'évaluation des savoirs scientifiques et d'expertise ou des décisions politiques. Nous ferons appel à lui de façon récurrente au long de notre thèse, et nous lui consacrerons plusieurs développements.

Nous introduisons en outre la notion de *système hyper-complexe*, que nous définissons comme un système complexe où des émergences inédites et imprévisibles prolifèrent et impactent l'état d'ensemble du système. Ce concept, associé à celui de *Reste causal*, a, entre autres choses, vocation à constituer une anti-dote à la quantophrénie et au mythe selon lequel les sciences et les techniques offriraient à l'humanité un potentiel de toute puissance et de maîtrise absolue de toute chose, confer l'analyse de M. Weber (1917). Le système bio-Terre et le système climatique sont des systèmes hyper-complexes, notamment en raison de l'influence du vivant et de ses incessantes émergences. Le concept d'hyper-complexité est au cœur de notre thèse.

Pour finir, comme dit précédemment, notre méthodologie relève de l'herméneutique et de la mise en intelligibilité. Elle résulte d'un vaste et dense travail de synthèse reposant sur un large éventail de méthodes. Dans le cadre de la préparation de notre thèse, par nous-même nous n'avons mené ni enquête ni entretien ni expérience ni observation de terrain (à quelques rares exceptions près) ni traitement statistique de données. En revanche, la mise en œuvre de notre méthodologie n'a pu être fructueuse qu'en s'appuyant sur des connaissances produites par la communauté scientifique et fondées sur de telles démarches scientifiques.

Nous allons maintenant présenter le plan de notre thèse et, ce faisant, apporter un éclairage sur la structure méthodologique de nos travaux.

Présentation du plan

Nous avons organisé notre thèse en quatre parties, respectivement titrées : Les contextes ; L'institution ; Études de cas ; Interprétations et ouvertures.

Dans la première partie, nous abordons successivement les contextes historique, géologique et idéologique, dans des dimensions constitutives de la structure méthodologique de notre thèse.

Le chapitre 1 présente l'émergence et le développement de l'hypothèse du changement climatique. Tout d'abord, dès le milieu du XIX^e siècle, cette hypothèse émerge en tant que question scientifique, mais elle est portée uniquement par des scientifiques. Ensuite, à partir du milieu des années 1970, cette question scientifique n'est plus seulement portée par des scientifiques, mais bénéficie d'un engagement politique international ; l'objectif politique est d'approfondir les connaissances relatives à l'hypothèse du changement climatique et de les rendre disponibles aux décideurs. Enfin, en 1992, avec la mise en place de la Convention cadre des Nations Unies sur les changements climatiques (CCNUCC) et l'engagement à agir face au réchauffement climatique, l'hypothèse du changement climatique change de statut et devient un objet politique international. Une dynamique science et politique était alors en place. Dans la deuxième partie de notre thèse, consacrée à l'institution GIEC, nous verrons que cette dernière, créée en 1988, sera la pièce maîtresse de cette dynamique. Avant d'aborder cette deuxième partie et afin d'en enrichir l'intelligibilité, ainsi que l'intelligibilité de l'ensemble de la suite de notre texte, nos deux chapitres suivants exposent deux contextes dans lesquels va s'inscrire la dynamique science et politique dont le centre est le GIEC, deux contextes d'où découlent une forte tension ou plutôt une contradiction frontale et une incompatibilité entre la hauteur de l'imprévisible et le règne de la quantophrénie.

Le chapitre 2 situe le changement climatique dans le contexte géologique d'une bifurcation du système bio-Terre dont l'origine est l'émergence d'Homo Sapiens au sein du vivant ; une bifurcation aux évolutions futures largement imprévisibles. Il y est montré que ce système et en son sein le système climatique sont sortis de la période géologique du Quaternaire et que la connais-

sance du futur du système bio-Terre et de son climat ne peut se déduire d'une simple projection du passé, mais qu'elle doit au contraire accorder une place conséquente aux émergences et à la part d'imprévisibilité. Finalement, ce chapitre montre le haut niveau d'imprévisibilité du changement climatique en raison de la bifurcation géologique entre deux éons - rendue visible par l'Annexe 1 - que connaît aujourd'hui le système-bio-Terre. Ce haut niveau d'imprévisibilité est en outre exploré à l'aide d'une série de phénomènes concrets, puis par un développement logique semblable à une démonstration mathématique.

Le chapitre 3 débute par une présentation du développement de la quantophrénie depuis la fin du XVIII^e siècle. Puis, nous présentons trois cas où l'imprévisible est exclu ou largement exclu d'une représentation du réel. Le premier, l'hypothèse de Gaïa, exclut une large part de l'imprévisibilité du système-Terre à l'aide d'un réenchantement du monde ; un réenchantement qui n'est toutefois pas le chemin inverse du désenchantement entendu au sens de Weber (Weber M., 1919). Le deuxième est une catégorie de projets d'ingénierie climatique ; des projets qui reposent sur la modification d'un déterminant quantifiable du climat et sur une absence de prise en considération de l'hyper complexité du système bio-Terre et de son imprévisibilité. Le troisième est une collapsologie qui repose sur des scénarios chiffrés et sur une absence de prise en considération de l'hyper-complexité de l'humanité et de son imprévisibilité. Ces trois exemples sont des illustrations, relatives au système bio-Terre et à son climat, de la forte présence de nos jours du biais de pensée qui consiste à ne pas prendre en considération la part imprévisible des déterminants du futur. Les deux derniers d'entre eux illustrent, en outre, la place occupée de nos jours par la quantophrénie dans les représentations de systèmes hyper complexes.

Dans la deuxième partie, nous présentons l'institution GIEC, ses scénarios et ses apports.

Le chapitre 1 décrit le GIEC, sa mission, ses acteurs, son organisation générale et le mode de rédaction et d'adoption de ses rapports. Nous y exposons la place du politique au sein du GIEC et finalement le rôle politique de cette institution d'expertise située à l'interface entre science et politique. Enfin, nous observons comment s'exprime, dès la première moitié des années 1990,

dans une commande du politique adressée au GIEC, la tension entre demande de quantification, d'un côté, et prise en compte de la complexité, de l'incertitude et de l'imprévisibilité, de l'autre.

Le chapitre 2 présente les scénarios climatiques du 5^e RE du GIEC (2013), ainsi que les incertitudes associées. Pour ce faire, nous abordons quelques aspects des modèles climatiques utilisés pour élaborer ces scénarios. En particulier, nous nous arrêtons sur le caractère inédit du changement climatique en cours et sur sa part d'imprévisibilité, puis de là nous abordons les limites et biais des résultats de la modélisation climatique – nécessairement quantifiés - dès lors qu'ils portent sur le futur. Quant aux incertitudes associées par le GIEC aux scénarios climatiques, nous en proposons une analyse critique et nous abordons l'influence ou la demande du politique en ce domaine. Enfin, nous présentons une analyse critique du mode de compilation des résultats de modèles climatiques divers en de simples scénarios ; compilation basée sur une simple moyenne arithmétique (sans pondération) des résultats obtenus par les différents modèles utilisés. Ce chapitre montre, notamment, que la demande ou les attentes politiques quantophréniques de données d'expertises quantifiées donnent lieu au recours à des méthodes dont la robustesse est, à tout le moins, questionnable.

Le chapitre 3 présente le rôle que le GIEC a joué dans la montée en puissance du changement climatique en tant que question politique. En particulier, nous observons le cheminement qui, au sein du GIEC, a débouché sur la pleine reconnaissance politique par l'ensemble des nations, en 2013, de l'existence d'un changement climatique d'origine anthropique. Puis, nous constatons l'adoption par des nations de plus en plus nombreuses, durant les toutes dernières années, de l'objectif de neutralité carbone vers 2050. Cet objectif consiste en une traduction politique, notablement simplifiée et peu prudente, de scénarios publiés par le GIEC en 2018 dans le rapport spécial 1,5°C ; dans le même temps, il constitue une élévation notablement conséquente des ambitions politiques. Enfin, nous concluons ce chapitre par une analyse de l'inscription de l'objectif de neutralité carbone dans un contexte de quantophrénie.

Dans la troisième partie, nous présentons trois études de cas qui renforcent, approfondissent et enrichissent les propos des deux parties précédentes sur la dynamique science et politique dans un contexte de quantophrénie et de haut niveau d'imprévisibilité.

Le chapitre 1 est une étude de la traduction politique des rapports du GIEC en un objectif quantifié, le *facteur 2*. Celui-ci fut une référence dans des pays du G8 - puis du G8 en lui-même. Il fut notamment une référence en France, durant un peu plus d'une décennie, de 2003 à 2015. L'observation de cette traduction politique, dont le lien effectif avec les rapports du GIEC s'avère particulièrement ténu, apporte un éclairage sur un contexte où les responsables politiques sont à la quête d'expertises chiffrées pour définir des stratégies d'action et prendre des décisions. Enfin, nous y observons le jeu d'acteur d'un scientifique et climatologue expert du GIEC qui endossa un rôle politique.

Le chapitre 2 apporte un éclairage concret sur la nature et le niveau de l'imprévisibilité de la concentration des GES durant le XXI^e siècle, et corrélativement sur la nature et le niveau de l'imprévisibilité du changement climatique. Son objet est le rôle du méthane dans le système climatique, et dans le réchauffement de ce dernier, avec un focus sur quatre sources naturelles potentielles de méthane - le dégel du pergélisol, la fonte de glaciers polaires, la fonte d'hydrates des fonds marins, les bouleversements du vivant marin. Chacune d'entre elles présente le risque de devenir une source conséquente de méthane, mais une source dont le profil d'émissions durant le XXI^e siècle possède un haut niveau d'imprévisibilité, ce qui fait obstacle à toute quantification fiable.

Ce chapitre contient le développement principal de la thèse et constitue une pièce centrale de sa structure méthodologique. Il apporte une nouvelle preuve de l'assertion selon laquelle l'imprévisible constitue une part, qui ne peut être contournée, de toute approche scientifique ou politique du devenir effectif du changement climatique au cours du XXI^e siècle. Ensuite, il enrichit et précise notre évaluation du risque climatique et de l'urgence à prévenir ce risque. De plus, il met en exergue la nécessité de surveiller ces quatre sources naturelles de méthane et d'amplifier

les recherches relatives à ces dernières. Enfin, il montre la nécessité de mettre un terme aux activités humaines pouvant perturber ces sources et intensifier leurs émissions. Pour finir, le dernier apport de ce chapitre, et non pas le moindre, est de nourrir notre analyse des scénarios du GIEC. En effet, nous y observons que chacune de ces sources naturelles constitue un phénomène causal du changement climatique, mais un phénomène hautement chargé d'imprévisible et renvoyé dans le *Reste causal* associé aux scénarios climatiques.

Le premier sous-chapitre rappelle le rôle majeur du méthane dans l'histoire longue du climat ; ce qui est illustré par le climat très chaud de l'éon Archéen, en raison d'émissions massives de ce gaz par des populations d'archées méthanogènes situées dans l'océan. Puis, un point est fait sur le réchauffement en cours. Tout d'abord, le rôle que le méthane y a joué jusqu'à ce jour est présenté et évalué. Ensuite, le rebond durant ces quinze dernières années de la concentration de ce gaz dans l'atmosphère est exposé, ainsi que l'état des connaissances et interrogations sur ses causes. Enfin, un développement sur l'accélération du changement climatique depuis 2014 est proposé. Finalement, ce premier sous-chapitre alerte sur l'importance qu'il revient d'accorder à ce puissant gaz à effet de serre dans toute évaluation de l'imprévisibilité climatique, et dans toute stratégie vis à vis du réchauffement climatique.

Le deuxième sous-chapitre présente les différentes sources d'émissions de méthane, naturelles ou d'origine anthropique.

Le troisième sous-chapitre présente une feuille de route, commune à quatre sous-chapitres, les 4^e, 5^e, 7^e, 8^e. Chacun de ceux-ci est consacré à l'une des quatre sources potentielles d'émissions de méthane citées plus haut.

Les quatrième, cinquième, septième et huitième sous-chapitres répondent à la feuille de route définie dans le troisième sous-chapitre. Dans chacun d'eux, à propos de la source de méthane qui lui revient, nous présentons tout d'abord une synthèse de travaux de recherche sur les émissions éventuellement conséquentes d'ici à la fin du XXI^e siècle. Il s'agit en particulier de regarder ce que disent ces travaux sur l'ampleur potentielle de ces émissions, sur leur caractère d'imprévisibilité et sur la possibilité ou non de les quantifier. Chacune de ces synthèses est composée de deux parties. La première porte sur les travaux publiés suffisamment tôt pour pouvoir être pris en compte par le 5^e RE ; plus particulièrement nous regardons si le risque d'émissions

conséquentes durant le XXI^e siècle était scientifiquement identifié lors de la rédaction du 5^e RE. La seconde partie intègre les travaux plus récents. Ensuite, notre regard se porte sur le 5^e RE du GIEC et ses scénarios climatiques pour le XXI^e siècle. Tout d’abord, nous observons si le 5^e RE du GIEC aborde ou non le risque d’émissions conséquentes de la source de méthane étudiée dans le sous-chapitre et, si oui, en quels termes. Ensuite, nous examinons ce rapport afin de savoir s’il présente le fait que la construction de ses scénarios climatiques ne prend pas en compte la source potentielle de méthane étudiée et, si oui, en quels termes.

Le sixième sous-chapitre aborde la modification des courants marins consécutifs au changement climatique. En effet, cette modification pourrait avoir des conséquences notables sur les émissions des sources de méthane étudiées dans les deux sous-chapitre suivants, c’est-à-dire dans le septième, consacré aux hydrates de méthane des fonds marins, et le huitième, consacré au vivant marin.

Le neuvième et dernier sous-chapitre porte sur le risque d’un emballement climatique lié aux sources de méthane que nous venons d’étudier, et sur le risque de changements brusques du climat. Nous sommes là au cœur de la démonstration de l’importance cruciale de l’imprévisible qu’invisibilisent les scénarios du GIEC.

Le chapitre 3 porte sur les Résumés à l’intention des décideurs des Rapports d’évaluation du GIEC. Ces RID sont les principaux documents de communication du GIEC. Nous y étudions l’évolution de leur contenu depuis le premier RE, publié en 1990, jusqu’au plus récent, le 6^e RE, publié en 2021. Plus précisément, il s’agit de leur contenu portant sur les émissions de méthane des quatre sources étudiées dans le chapitre 2, et plus largement sur l’imprévisibilité et le risque d’emballement du réchauffement. Nous observons cette évolution à l’aune de la mission du GIEC et des interactions science et politique qui s’expriment au sein de cette institution. Nous verrons, notamment, que durant deux décennies ces RID ont été le lieu d’un repli stratégique dont la concrétisation a consisté en un effacement du *Reste causal* associé aux scénarios, nécessairement quantifiés, et donc en un effacement de l’imprévisible doublé d’une édulcoration du risque.

Dans la quatrième partie, nous présentons des éléments de synthèse interprétatifs des parties précédentes, ainsi que des ouvertures et élargissements au-delà du cœur de notre thèse.

Le premier chapitre propose des approfondissements autour du *Reste causal*, du quantifiable, de l'imprévisible et du Principe de précaution.

Le premier sous-chapitre illustre la portée du *Reste* par son application à deux objets autres que les scénarios du GIEC, à savoir la notion d'*Empreinte écologique* et l'expression *Toute chose étant égale par ailleurs*. Puis, il étudie l'apport potentiel du *Reste causal* et les conditions de cet apport dans les domaines de la communication scientifique, de l'expertise scientifique et de la décision politique. En particulier, il aborde la question de l'utilisation du *Reste causal* dans le processus de décision d'appliquer ou non le Principe de précaution, du moins pour les nations et organisations qui ont adopté ce Principe.

Le second sous-chapitre explore et évalue, en s'appuyant sur les parties I et II de notre thèse, l'évolution de 1992 à aujourd'hui de l'usage du Principe de précaution dans les politiques internationales relatives au changement climatique.

Le deuxième chapitre porte sur la dynamique, les interactions et les influences entre politique, expertise et recherche au sein du GIEC ou liées au GIEC. Dans un premier temps, le propos porte sur la coconstruction science et politique au service d'une mobilisation politique. Puis, nous abordons l'impact du GIEC sur la recherche, en particulier une normalisation de la recherche, pour partie liée à une motivation politique des chercheurs face à la hauteur des enjeux climatiques pour les sociétés humaines. Enfin, via un exemple, nous illustrons le fait que la relation science et société relative au changement climatique connaît des développements hors du GIEC ; en notant que, toutefois, ces développements ne viennent en rien infirmer le constat d'une forme d'hégémonie du GIEC exercée sur cette relation.

Le troisième chapitre développe une réflexion sur des résumés des rapports du GIEC alternatifs aux RID. Nous débutons par des modes de représentation du futur du climat qui constituent des alternatives aux scénarios du GIEC. Puis, après avoir motivé la rédaction de résumés des RE alternatifs aux RID, nous proposons des principes généraux puis des modes de rédaction (par qui et comment). L'objectif n'est pas que ces résumés alternatifs se substituent aux Résumés rédigés par le GIEC, mais que d'autres finalités soient visées.

Le quatrième et dernier chapitre propose des perspectives de recherche dans le prolongement de notre thèse. Dans un premier sous-chapitre, nous présentons des perspectives pour nos propres contributions. Puis, dans un second sous-chapitre, nous proposons des perspectives situées au-delà de nos propres travaux à venir.

PREMIÈRE PARTIE

Les contextes

Chapitre 1 – Genèse d’une question scientifique et politique

Ce chapitre présente le processus historique, dans un premier temps scientifique, puis scientifique et politique, d’où est issue la création du GIEC.

La première base scientifique de l’hypothèse d’un changement climatique global d’origine anthropique a été posée en 1856, par la scientifique étasunienne Eunice Foote. Puis il faudra attendre près d’un siècle et les années 1950 pour que cette hypothèse devienne une question scientifique majeure. Quant au consensus scientifique autour de l’existence de ce changement, il ne s’est construit que récemment, durant les deux dernières décennies du XXe siècle ; une date majeure est celle de la publication des résultats de l’analyse des calottes glaciaires de Vostok, le 1^{er} octobre 1987.

Au plan politique, répondant à la convergence croissante des travaux scientifiques en faveur de l’hypothèse d’un réchauffement climatique conséquent d’origine anthropique, l’année 1974 a vu un premier acte international des gouvernements. Cependant, il ne s’agissait pas, dès lors, d’engager des actions concrètes contre les causes du réchauffement, mais d’adresser une demande d’information aux scientifiques et, à cet effet, de mettre en place une première structure internationale, le *Comité d’experts des changements climatiques*. Une dynamique internationale science et politique était amorcée. Quatorze ans plus tard, en 1988 le GIEC voyait le jour. Puis il faudra attendre neuf ans pour que, en 1997, l’Accord international de Kyoto contienne les premiers objectifs politiques visant à atténuer le réchauffement.

Les sous-chapitres I.1.2. à I.1.4 ci-dessous sont pour une large part un résumé de la rubrique *The Carbon Dioxide Greenhouse Effect*¹³ du site *The Discovery of Global Warming* créé par Spencer Weart et publié sur le site Web du Center for History of Physics de l'American Institute of Physics. Les citations non référencées de ces trois sous-chapitres sont extraites de cette rubrique.

I.1.1 - XVII^e et XVIII^e siècles : alertes locales et intuitions sans preuve scientifique

Au XVII^e, XVIII^e et XIX^e siècles, des philosophes, des écrivains et des scientifiques ont considéré que l'action des humains déstabilisait ou déstabiliserait la nature (plantes et animaux) et le climat. Ils ont lancé des alertes. (Bonneuil et Fressoz, 2013). Cependant, jusqu'au début du XIX^e siècle, en ce qui concerne le climat global, il s'agissait d'intuitions ou d'approches théoriques dont les fondements étaient hautement discutables, par exemple, « *selon les ingénieurs Rauch et Rougier de la Bergerie ou bien selon Joseph Banks, secrétaire de la Royal Society, la déforestation aux États-Unis et en Europe augmente l'humidité dans l'atmosphère, celle-ci se condense aux pôles, accroissant la calotte glaciaire et causant les mauvaises saisons en Europe.* » (Bonneuil et Fressoz, 2013, p.203-204).

I.1.2 - De l'hypothèse de l'effet de serre atmosphérique à la découverte de Gaz à effet de serre

Aujourd'hui, nous savons qu'un certain nombre de gaz contenus dans l'atmosphère terrestre sont la source d'un effet de serre (renvoi vers le sol terrestre d'une partie de l'énergie du rayonnement infrarouge émis par la surface de la Terre, elle-même chauffée par le rayonnement solaire). Pour chacun de ces Gaz à effet de serre (GES) et pour leur combinaison la mesure de l'effet de serre est aujourd'hui donnée avec une bonne précision. Parmi ces GES, les quatre principaux sont, par ordre décroissant d'importance, la vapeur d'eau (H₂O), le gaz carbonique

¹³ https://history.aip.org/climate/co2.htm#M_4. Vu le 3 novembre 2021, puis le 5 août 2022.

(CO₂), le méthane (CH₄) et le protoxyde d'azote (N₂O). Lors d'activités humaines, certains de ces gaz (CO₂, CH₄, N₂O...) sont rejetés dans l'atmosphère. La conséquence en est une augmentation de leur taux de présence dans l'atmosphère et, de là, une augmentation de l'effet de serre, le tout à l'échelle de la planète. Nous allons maintenant évoquer quelques étapes de la construction de la connaissance scientifique de cet effet de serre et de son lien avec le changement climatique en cours.

En 1827, le Français Jean-Baptiste Fourier ouvre la voie vers un premier stade de théorisation scientifique (Fourrier J.-B., 1827 ; Dufresne J.L., 2006). En effet, il émet l'hypothèse selon laquelle l'effet de serre de boîtes en verre, découvert au siècle précédent par le Genevois Horace-Bénédict de Saussure (1740 – 1799), peut s'appliquer à l'ensemble de l'atmosphère. Toutefois, « *il reconnaît son incapacité à donner une mesure quantitative de cet effet* » (Touzé-Peiffer L., 2018, p.80) ; ce qu'il exprimait en ces termes : « *Il est difficile de connaître jusqu'à quel point l'atmosphère influe sur la température moyenne du globe, et l'on cesse d'être guidé dans cet examen par une théorie mathématique régulière.* » (Dufresne J.L., 2006, p.44). Notons, par ailleurs, qu'il s'agissait alors d'un effet de serre de l'atmosphère dans sa totalité, sans distinction des gaz qui la composent.

En 1856, l'Étatsunienne Eunice Foote montra que le dioxyde de carbone et la vapeur d'eau retiennent de la chaleur lorsqu'ils sont exposés au soleil. Elle suggéra que la variation des quantités de ces gaz dans l'atmosphère pourrait causer des changements climatiques. (Roland J., 2020). Sa découverte de l'effet de serre du CO₂ posait de fait la question du risque d'un futur réchauffement climatique éventuellement majeur du fait des émissions de ce gaz par la machine à vapeur ; elle ouvrait une question de quantification qui trouva une première réponse, près de quatre décennies plus tard, dans les travaux de Svante Arrhenius. Il est à remarquer que pendant très longtemps la découverte d'Eunice Foote, femme scientifique, fut oubliée et n'était pas citée par les historiens des sciences, contrairement au travail de John Tyndal, effectué trois ans plus tard.

En 1859, John Tyndal confirma et enrichit les résultats d'Eunice Foote. Il montra que l'eau, le dioxyde de carbone et le méthane retiennent sous forme de chaleur une partie de l'énergie des

rayonnement infrarouges. Il émit l'hypothèse que ces gaz auraient joué des rôles importants dans les évolutions du climat passé.

I.1.3 - Émergence et « retrait » scientifiques de l'hypothèse d'un futur réchauffement climatique d'origine anthropique

En 1895, le Suédois Svante Arrhenius se tourna vers le futur et étudia l'hypothèse d'un changement climatique à venir (Arrhenius, 1896). Toutefois, il considéra que les émissions industrielles du dioxyde de carbone ne pouvaient entraîner un réchauffement climatique conséquent qu'à une échelle de temps plurimillénaire ; en outre, habitant un pays nordique, il voyait en cette hypothèse une source d'amélioration des conditions de vie. Par la suite, vu l'accroissement rapide des émissions anthropiques de CO₂, il ramena l'échéance d'un réchauffement climatique à quelques siècles ; ce qui, à ses yeux, n'en faisait pas pour autant une source d'inquiétude.

Dans les décennies suivantes et jusqu'au milieu du XX^e siècle, divers arguments ou hypothèses ont mis à mal l'hypothèse et les évaluations quantifiées du réchauffement climatique à venir émises par S. Arrhenius. Citons pêle-mêle : l'absorption du dioxyde de carbone d'origine anthropique par les océans, par les plantes ; la saturation de l'effet de serre ; l'effet de serre du dioxyde de carbone perçu comme négligeable par rapport à celui de la vapeur d'eau ; la non diffusion vers le sol de la chaleur issue de l'effet de serre du dioxyde de carbone ; etc. Si bien que cette hypothèse et ces évaluations ne furent plus défendues que par quelques scientifiques isolés et elles passèrent inaperçues.

Cependant, en 1938 les travaux de l'Anglais Guy Steward Callendar firent un peu exception. Selon ceux-ci, le taux de CO₂ dans l'atmosphère avait augmenté de 10 % depuis le début de l'ère industrielle et expliquait un léger réchauffement climatique. Mais, s'ils furent régulièrement cités, peu de crédit leur fut apporté, en premier lieu en raison de l'absence de mesure fiable de la teneur moyenne en CO₂ de l'atmosphère terrestre. Aussi, Callendar lui-même reconnut que des phénomènes, par exemple les modifications du système nuageux, auront des effets sur le climat qui ne pouvaient, à cette époque, donner lieu à aucune quantification fiable et interdisaient donc d'affirmer qu'une augmentation du taux atmosphérique de CO₂ entraînerait

dans le futur un réchauffement climatique. En d'autres termes, se présentait l'éventualité d'une rétroaction négative du système nuageux venant neutraliser l'éventuel surplus d'effet de serre occasionné par le surplus de CO₂ dans l'atmosphère. (Par définition, une rétroaction négative à un phénomène donné, par exemple le réchauffement climatique, atténue ce phénomène (éventuellement jusqu'à sa disparition), alors qu'une rétroaction positive l'accroît).

I.1.4 - Le retour de l'hypothèse

L'après guerre et la guerre froide donnèrent lieu à un financement accru de la recherche aux États-Unis, dans une finalité militaire, ce qui favorisa la recherche et les découvertes relatives au climat, d'autant que « *presque tout ce qui se passait dans l'atmosphère et les océans pouvait être important pour la sécurité nationale.* ». De plus, l'émergence et le développement des ordinateurs procuraient une précieuse puissance de calcul, sans cesse croissante ; s'y ajoutèrent une multiplication et un enrichissement des données, en particulier avec la mise sur orbite terrestre de satellites recueillant des données météorologiques et climatiques dès le tout début des années 1960. Il s'en est suivi une série de découvertes qui relancèrent l'hypothèse d'un réchauffement climatique à venir consécutif aux émissions anthropiques de GES.

En 1952, l'Étatsunien Lewis D. Kaplan montra que dans la partie supérieure de l'atmosphère le surplus de CO₂ s'y traduisait par un accroissement de l'effet de serre (Kaplan L. D., 1952). Quatre ans plus tard, en 1956, le Canadien Gilbert N. Plass montra que le surplus d'énergie calorifique dans la haute atmosphère dû au surplus de dioxyde de carbone a pour conséquence une élévation de la température de l'atmosphère proche de la surface terrestre. Cependant, aux démonstrations de Kaplan et Plass était associé un *Reste* conséquent. Par exemple, elles ne prenaient pas en considération les conséquences de ce surplus de CO₂ sur la vapeur d'eau et sur les nuages. Toutefois, les travaux des deux auteurs montraient que l'hypothèse d'un futur réchauffement ne pouvait pas être rejetée en utilisant des arguments relatifs au seul effet de serre du CO₂, que ce soit l'argument de saturation de cet effet de serre ou celui d'une absence de diffusion de la chaleur.

Par ailleurs, en 1955 l'Autrichien Hans Suess (qui avait immigré aux États-Unis en 1950) montra que du carbone issu de l'utilisation d'énergies fossiles (charbon, pétrole, gaz naturel) était présent, de façon croissante, dans l'atmosphère ; sa méthode reposait sur une analyse du

taux de l'isotope carbone 14 dans les arbres. Puis, toujours grâce au carbone 14, il montra que les océans absorbaient une part de ce carbone d'origine fossile. Toutefois, les calculs de H. Suess, « *préliminaires et peu sûrs* » ne permettaient pas de quantification fiable.

Enfin, dès la fin des années 1950 les scientifiques Gilbert Norma Plass et Roger Revelle, respectivement Canadien immigré aux États-Unis et Étasunien, alertèrent sur l'éventualité d'un réchauffement climatique dont la preuve empirique planétaire pourrait être acquise dès le début du XXI^e siècle. Plus précisément, selon eux, dès le début du XXI^e siècle le réchauffement effectif pourrait sortir du « bruit naturel » et ne pas trouver d'explication autre que celle des émissions anthropiques de GES. En d'autres termes, selon Plass et Revelle, la variabilité climatique naturelle pourrait cacher le changement climatique jusqu'à la fin du XX^e siècle, puis l'ampleur de ce dernier pourrait devenir suffisamment importante pour ne plus pouvoir se situer dans cette variabilité.

Il s'avérera que les résultats des travaux de modélisation climatique seront conformes à cette anticipation. En effet, la preuve par la modélisation climatique du réchauffement d'origine anthropique, sera obtenue au début des années 2000 ; moment où, pour la première fois, le réchauffement se situera au-delà des fluctuations naturelles.

Au début des années 1960, le Suédois Keeling parvint à mesurer l'accroissement sur plusieurs années du taux de dioxyde de carbone dans l'atmosphère, la fameuse courbe de Keeling était née (Figure 1). Plus exactement, il s'agit de la courbe de la mesure depuis 1957 du taux de CO₂ à Mauna Lao, volcan qui culmine à 4169m sur l'île d'Hawaï (États-Unis). « *Rapidement, la courbe de Keeling, irrégulière mais inexorablement ascendante, a été largement citée par les comités d'examen scientifique et les journalistes scientifiques. Pour les scientifiques comme pour le public, elle est devenue la principale icône de l'effet de serre.* ». (VOA¹⁴)

14 « Soon Keeling's curve, jagged but inexorably rising, was widely cited by scientific review panels and science journalists.(40) For both scientists and the public it became the primary icon of the greenhouse effect. ».

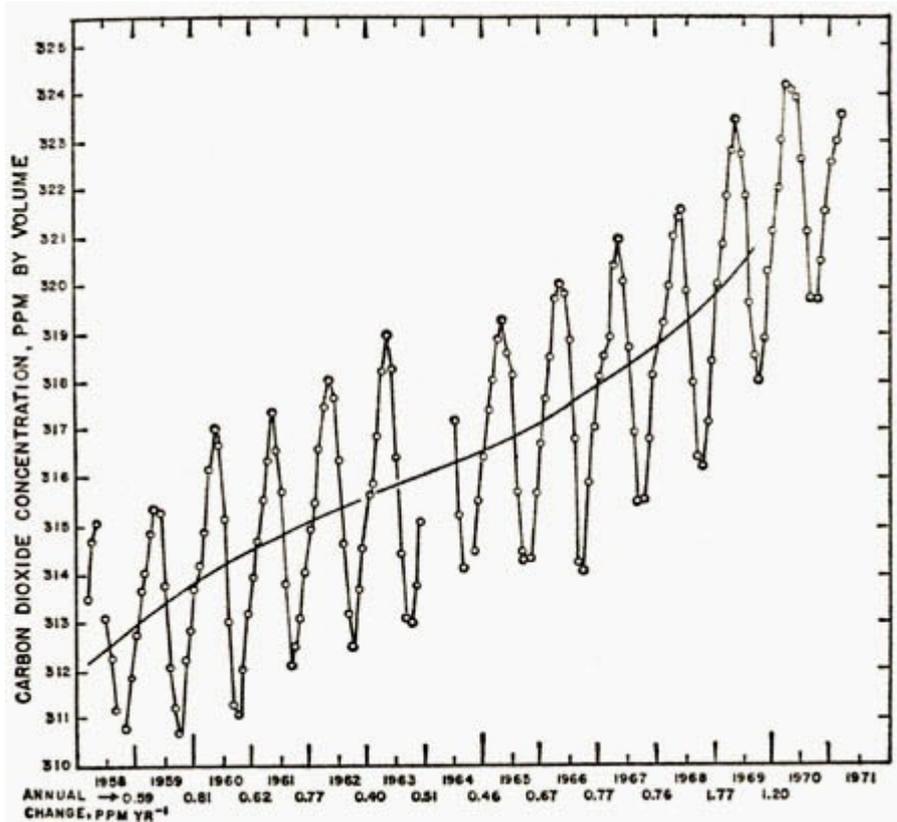


Figure 1: Courbe de Keeling (d'après Inadvertent Climate Modification. Report of Conference, Study of Man's Impact on Climate (SMIC), Stockholm, edited by Carroll L. Wilson and William H. Matthews, p. 234, copyright MIT Press, 1971).

En 1963, l'Allemand Fritz Möller, prétendit montrer qu'une augmentation de l'effet de serre consécutive à une augmentation du taux de CO₂ n'impacterait pas la température terrestre, en raison d'une puissante rétroaction négative du système nuageux. Ses travaux ne furent pas validés, mais ses conclusions eurent néanmoins une résonance¹⁵ non négligeable dans la sphère scientifique ; ce qui illustre une situation, dans les années 1960, où de nombreux scientifiques ne reconnaissaient pas le risque et la menace d'un changement climatique. Ce n'est que durant les années 1970 que les travaux se multiplièrent et débouchèrent sur un tournant. Selon Shardul Agrawala (1998, p. 606-607), c'est en 1979 et au début des années 1980 que « *l'attention prédominante de la communauté scientifique s'est éloignée de la variabilité climatique et a conver-*

15. Confer National Academy of Sciences-National Research Council, 1966. *Weather and Climate Modification Problems and Prospects: Final Report of the Panel on Weather and Climate Modification*. Page 88.

gé vers la possibilité de tendances au réchauffement du climat moyen découlant de l'augmentation des concentrations de gaz à effet de serre ».

Il ne peut donc sembler guère étonnant que, en 1972, le rapport Meadows du Club de Rome, *Les limites à la croissance*, qui tira la sonnette d'alarme à propos de l'environnement, ne prit pas en compte le changement climatique.

I.1.5 – Juillet 1979, Le Rapport Charney de l'Académie américaine des sciences

En 1979, la température terrestre n'avait pas retrouvé son niveau du début des années 1940 ; depuis l'après guerre le climat était toujours situé sur un plateau (cette question est développée dans la section III.2.1.6). Dans le même temps, des travaux de recherche alertaient sur l'éventualité probable d'un changement climatique d'origine humaine et, à la demande de l'Assemblée générale de l'ONU (1974), l'OMM avait pour mission d'étudier le changement climatique (nous y reviendrons dans la section I.1.7.2). Dans ce contexte, Jimmy Carter, Président des États-Unis, adressa une commande à l'Académie américaine des sciences, qui se traduisit en juillet 1979 par la publication par cette éminente institution du rapport *Carbon Dioxide and Climate : a Scientific Assessment*, plus communément appelé Rapport Charney, du nom de son principal auteur. Ce rapport marqua un tournant dans la perception du changement climatique par le monde scientifique et politique aux États-Unis (à tout le moins au niveau de l'État fédéral) et au-delà. Il y était notamment affirmé qu'aucune rétroaction négative importante n'était connue, et que, selon les connaissances de la fin des années 70, si les émissions de gaz à effet de serre se poursuivaient de telle manière que le taux de CO₂ dans l'atmosphère devait être au moins multiplié par deux, alors le climat devrait se réchauffer au moins entre 1,5°C et 4,5°C. Cependant, le rapport précisait que des incertitudes se situaient « *au-delà de celles qui découlent de notre connaissance nécessairement imparfaite du système climatique complexe de la terre* » (VOA¹⁶) (Charney, 1979, p.1). L'imperfection des connaissances liées à la complexité du système climatique ne permettait donc pas d'apporter de conclusion définitive.

16 « *beyond that arising from our necessarily imperfect knowledge of the manifold and complex climatic system of the earth* ».

La première partie du rapport présentait un résumé qui se termine en ces termes : « *Nous concluons que les prédictions des changements climatiques induits par le CO₂ faites avec les différents modèles examinés sont fondamentalement cohérentes et se soutiennent mutuellement. Les différences entre les résultats des modèles sont relativement faibles et peuvent s'expliquer par les différences entre les caractéristiques des modèles et les hypothèses simplificatrices. Bien entendu, nous ne pouvons jamais être sûrs qu'un effet mal estimé ou totalement ignoré ne vienne pas entacher nos conclusions. Nous pouvons seulement dire que nous n'avons pas été en mesure de trouver de tels effets. Si la concentration de CO₂ dans l'atmosphère est effectivement doublée et qu'elle le reste suffisamment longtemps pour que l'atmosphère et les couches intermédiaires de l'océan atteignent un équilibre thermique approximatif, notre meilleure estimation est que des changements de la température globale de l'ordre de 3° C se produiront et qu'ils seront accompagnés de changements significatifs dans les modèles climatiques régionaux.* » (VOA¹⁷) (Charney, 1979, p.17).

Nous pouvons noter que les auteurs du rapport, animés par un esprit de rigueur scientifique, précisent qu'il pourrait y avoir un *Reste* suffisamment conséquent pour entacher leur conclusion. Cette rigueur les amène par ailleurs à, dans le résumé¹⁸ (avant l'extrait repris ci-dessus) et de façon développée dans le texte complet¹⁹, mettre l'accent sur une question sans réponse, la couche intermédiaire des océans va-t-elle ou non se réchauffer dès les prochaines décennies ?

17 « *We conclude that the predictions of CO₂-induced climate changes made with the various models examined are basically consistent and mutually supporting. The differences in model results are relatively small and may be accounted for by differences in model characteristics and simplifying assumptions. Of course, we can never be sure that some badly estimated or totally overlooked effect may not vitiate our conclusions. We can only say that we have not been able to find such effects. If the CO₂ concentration of the atmosphere is indeed doubled and remains so long enough for the atmosphere and the intermediate layers of the ocean to attain approximate thermal equilibrium, our best estimate is that changes in global temperature of the order of 3° C will occur and that these will be accompanied by significant changes in regional climatic patterns.* »

18 P. 2.

19 P. 10-11.

Aussi, ils précisent que dans le cas d'un tel réchauffement rapide de cette couche intermédiaire, le réchauffement climatique à la surface de la Terre serait décalé de plusieurs décennies.

Finalement, en 1979, selon le rapport Charney, la recherche scientifique ne donnait pas de connaissance absolue de l'existence à venir d'un changement climatique d'origine humaine, mais les connaissances scientifiques étaient alors suffisamment consistantes et convergentes pour que les responsables politiques puissent être alertés. Toutefois, le rapport ne sortait pas du domaine scientifique et son contenu n'empiétait pas sur le champ politique ; il ne comportait aucune alerte explicite ni aucun appel à l'amorce d'une transition.

Rapport Wigley et Jones, 1981

Deux ans plus tard, en 1981, deux scientifiques firent une revue des résultats de la modélisation climatique (Wigley et Jones, 1981) dont ils conclurent : « *Les effets du CO₂ ne seront peut-être pas détectables avant la fin du siècle. À ce moment-là, la concentration atmosphérique de CO₂ sera probablement devenue suffisamment élevée (et de plus une augmentation supplémentaire sera engagée) pour qu'un changement climatique nettement plus important que celui qui sera produit au cours du siècle précédent soit inévitable. Pour éviter un tel changement, il est possible que des décisions doivent être prises (par exemple réduire les émissions anthropiques de CO₂) quelques temps avant que soient disponibles des "preuves" d'observations sans équivoque des effets du CO₂ sur le climat.* ». (VOA²⁰). Nous pouvons ici proposer deux remarques. Tout d'abord, les deux auteurs confirment les conclusions de Plass and Revelle, faites plus de vingt ans auparavant, selon lesquelles la preuve incontestable grandeur nature attendue devrait probablement advenir au tournant de l'an 2000. Ensuite, contrairement au Rapport Charney, ils intègrent explicitement une alerte d'ordre politique ; mais une alerte à la formulation prudente - scientifiquement et logiquement rigoureuse – qui ne donne pas de consigne au politique : « *Pour éviter un tel changement (climatique), il est possible que des décisions auront à être appliquées quelques temps avant l'observation irréfutable d'une preuve* ».

20 « *The effects of CO₂ may not be detectable until around the turn of the century. By this time, atmospheric CO₂ concentration will probably have become sufficiently high (and we will be committed to further increase) that a climatic change significantly larger than any which has occurred in the past century could be unavoidable. To avert such a change it is possible that decisions will have to be made (for example, to reduce anthropogenic CO₂ emissions) some time before unequivocal observational « proof » of the effects of CO₂ on climate is available.* »

I.1.6 - 1987, première observation empirique de la corrélation taux de CO₂-température sur 160 000 ans

Le 1er octobre 1987, trois articles de la revue *Nature* (Jouzel & al., 1987 ; Barnola & al., 1987 ; Genthon & al., 1987) exposaient les résultats des analyses d'une carotte de glace longue de plus de deux kilomètres, de la station russe de Vostok en Antarctique, menées par une équipe internationale fondée et dirigée par le Français Claude Lorius. L'hypothèse d'un réchauffement climatique global dû aux gaz à effet de serre émis par les activités humaines en était notablement renforcée. En effet, ces articles montraient une corrélation entre la variation du taux de CO₂ dans l'atmosphère et la variation de la température terrestre, cela tout au long des 160 000 années avant l'ère industrielle. Cette corrélation, couplée avec les variations des paramètres de l'orbite de la Terre autour du soleil, appelés paramètres de Milankovitch, constituait une première observation empirique de dimension planétaire appuyant la théorie d'un changement climatique d'origine humaine. Jean Jouzel, climatologue français qui participa à l'expédition scientifique de Vostok en résumera l'apport en ces termes : « *Nous confirmons ainsi que ce qui préside aux grandes phases, c'est bien l'astronomie, la position de la Terre par rapport au Soleil, mais que lors des réchauffements le CO₂ amplifie le phénomène.* »²¹ Finalement, les chiffres de l'augmentation rapide du taux de CO₂ depuis le début de l'ère industrielle, confrontés à ces trois articles de *Nature*, confortaient l'hypothèse selon laquelle un changement climatique était en cours et devrait devenir rapide et conséquent. En effet, en 1987 le gaz carbonique était déjà présent dans l'atmosphère à un niveau largement plus élevé que durant les 160 000

21 Jean Jouzel, *L'effondrement n'est pas imminent. Je nous vois griller à petit feu*, entretien par Nathaniel Herzberg, 2 juin 2019, Le Monde.fr, https://www.lemonde.fr/planete/article/2019/06/02/jean-jouzel-l-effondrement-n-est-pas-imminent-je-nous-vois-griller-a-petit-feu_5470360_3244.html

ans qui ont précédé le XX^e siècle. Le CO₂ avait fluctué entre 180 et 300ppm²² durant ces 160 000 ans, il était monté à environ 350ppm²³ en 1987 (en 2019 il atteindra 410ppm²⁴).

Cependant, en 1987 C. Lorius et son équipe de chercheurs gardèrent une position « mesurés ». Tout en considérant que « *les carottages de Vostok sont la première preuve tangible d'une interaction entre gaz à effet de serre, forçage orbital et climat* », ils tinrent ce propos : « *Nous restons prudents quant à l'extrapolation de cette analyse du passé sur l'impact de l'augmentation récente de CO₂ d'origine humaine sur le climat futur* ». (Lorius et Carpentier, 2010, p.51).

I.1.7 – De l'émergence d'une inscription politique au niveau international au protocole de Kyoto

I.1.7.1 – Les prémices

Cette section a pour référence le chapitre *Depuis quand le climat est-il devenu un enjeu?*, d'un article de J. W. Zillman (2009). Les citations en sont extraites, sauf indication contraire.

La première inscription du climat à l'agenda international date de 1961. Elle consista en la résolution 1721 (XVI) de l'Assemblée générale des Nations Unies qui appelait « *l'OMM et l'organisation non gouvernementale qu'est le Conseil international des unions scientifiques (ICSU, International Council of Scientific Unions) à collaborer en vue de favoriser de nouvelles percées scientifiques et technologiques pour surveiller, prévoir et, à terme, maîtriser le temps et le climat* ». Nous notons que cette résolution repose sur la croyance, pointée par Max Weber à propos du monde désenchanté, en la maîtrise (à terme) de toute chose par la technique et la prévision. Cette

22 ppm :parties par million, en nombre de molécules. Un taux de dioxyde de carbone de 400ppm signifie que parmi un million de molécules d'air sec (les molécules de vapeur d'eau ne sont pas prises en compte) se trouvent 400 molécules de dioxyde de carbone.

23 Voir GT1, 4^eRE, fig 2.3, p.138.

24 Voir RID du GT1, 6^e RE, section A.1.1, p.5.

résolution déboucha sur la création de la *Veille météorologique mondiale* de l'OMM, en 1963²⁵ ; puis, en 1967²⁶, sur la création du *Programme de recherche sur l'atmosphère globale (GARP, Global Atmospheric Research Programme)* sous l'égide de l'OMM et de l'ICSU. Ces deux nouvelles institutions avaient un double objet principal, la météorologie et le climat. Concernant le climat, qui est notre objet d'étude, pour la première il s'agissait de « *mettre en place l'infrastructure de base nécessaire à l'échelle mondiale pour (...) décrire et surveiller le climat* » ; pour le second il s'agit d'« *établir les bases scientifiques de la prévision climatologique* ». Notons enfin qu'il est ici question de climat et non pas de changement climatique. Nous étions alors dans un contexte où se développait une volonté de maîtriser la météo et le climat aux échelles locales ou régionales, motivée par des enjeux allant du domaine de l'agriculture à celui du militaire. Cependant, la maîtrise du climat et de la météorologie d'un territoire donné ne peut être pleinement acquise sans une maîtrise au plan globale. En outre, en la matière toute maîtrise locale ou régionale est porteuse de conséquences sur les territoires voisins, voire au-delà.

De l'ICSU à l'ISC

Le Conseil international des unions scientifiques, l'ICSU, a été fondé en 1931. En 1998, il est devenu le Conseil international pour la science, mais garda le sigle ICSU. En 2018, l'ICSU fusionna avec le Conseil international des sciences sociales, donnant naissance au Conseil international des sciences (CIS) ou International Science Council (ISC).

I.1.7.2 – Vers la création du GIEC

25 <https://public.wmo.int/fr/bulletin/cinquanti%C3%A8me-anniversaire-de-la-veille-m%C3%A9t%C3%A9orologique-mondiale>

26 <https://council.science/fr/what-we-do/our-work-at-the-un/climate-change/history-icsu-and-climate-change/>

Nous nous sommes appuyés sur les articles de J. W. Zillman (2009) et S. Agrawala (1998) pour rédiger cette section.

Treize ans après sa résolution de 1961, en 1974 l'Assemblée générale de l'ONU invita l'OMM à « *entreprendre une étude du changement climatique* » ; ce qui se traduit par la mise en place par l'OMM d'un Comité d'experts des changements climatiques. Nous verrons que de là s'est ouverte une phase qui mena à la création des institutions internationales en charge du changement climatique qui aujourd'hui sont toujours en place.

En 1977, ce Comité d'experts remit un rapport, le *Rapport technique présenté par le Groupe d'experts des changements climatiques du Comité exécutif de l'OMM*²⁷, sur la base duquel l'OMM décida l'organisation de la première Conférence mondiale sur le climat.

En 1979, du 12 au 23 février, cette Conférence s'est tenue à Genève, à l'invitation de l'OMM, en collaboration avec l'UNESCO, la FAO, l'OMS, le PNUE, l'ICSU... La première semaine de la conférence avait réuni environ 350 spécialistes de toutes disciplines, issus de 53 pays. Puis, durant une seconde semaine, une formation plus restreinte de 100 experts délibéra. En conclusion, les organisateurs publièrent une déclaration dont voici un extrait :

« *La Conférence mondiale sur le climat a pris la mesure de l'influence omniprésente du climat sur les activités humaines et a exhorté les nations du monde entier à engager, sans tarder, l'action requise pour :*

- *tirer pleinement parti des connaissances actuelles sur le climat ;*
- *prendre des mesures afin de faire progresser ces connaissances de manière significative ;*
- *prévoir et prévenir les changements climatiques qui seraient dus à l'activité de l'Homme et dont les effets seraient néfastes pour le bien-être de l'humanité. »*

Nous notons ici la présence explicite de la question des changements climatiques qui seraient d'origine humaine. De plus, les termes employés préfigurent les missions des trois principales

²⁷ *Bulletin de l'OMM*, 1977, vol. 26, n° 1, p. 55-61.

organisations qui, aujourd'hui encore en 2022, constituent le socle institutionnel des politiques climatiques internationales :

- Le GIEC, chargé de l'expertise scientifique, « *Tirer pleinement parti des connaissances actuelles sur le climat* »).
- Le Programme mondial de recherche sur le climat (PMRC), chargé de la recherche, « *Prendre des mesures afin de faire progresser ces connaissances de manière significative* ».
- La CCNUCC, chargée des engagements politiques, « *exhorte les nations du monde entier à engager, sans tarder, l'action requise pour (...) prévenir les changements climatiques (...) dont les effets seraient néfastes pour le bien-être de l'humanité* »).

Par ailleurs, de cet extrait de la déclaration finale, l'expression « *Prévoir et prévenir les changements climatiques...* » montre que la croyance en la capacité de prévoir puis de maîtriser, pointée par Max Weber, restait présente.

Dès après la conférence mondiale, en avril-mai 1979, l'OMM a tenu son congrès (le huitième congrès météorologique mondial), lequel décida que « *en tant qu'institution spécialisée dans la météorologie et le climat – au sein du système des Nations Unies, l'OMM se devait d'assumer un rôle de chef de file dans la promotion d'études sur la variabilité et le changement climatiques, ainsi que sur leurs implications pour la société et l'environnement* ». Concrètement, ce congrès pris la décision de rapidement mettre en place le Programme mondial de recherche sur le climat (PMRC). C'est ainsi qu'en 1980 le PMRC succéda au Programme de recherche sur l'atmosphère globale (GARP).

Notons que ce congrès, composé des représentants de l'ensemble des gouvernements des États membres de l'OMM, s'est terminé en mai 1979, soit deux mois avant la publication du rapport Charney de l'Académie américaine des sciences, et quatre ans après l'Assemblée générale de l'ONU de 1974 d'où émergea l'interaction science et politique au plan international. Un pas important a donc été franchi à l'échelle internationale au cours de la période 1974-1979 dans la reconnaissance par les responsables politiques de l'importance de la recherche afin d'approfondir les informations scientifiques relatives au changement climatique.

Il restait, conformément aux conclusions de la première Conférence mondiale sur le climat, à mettre en place ce qui sera le GIEC et la CCNUCC. En octobre 1985, l'OMM, le PNUE et l'IC-

SU organisèrent la Conférence de Villach qui réunit des scientifiques de 29 pays. Une déclaration finale appelait « *les gouvernements et autres bailleurs de fonds* » au développement de travaux de recherche pour mieux connaître la nature de la menace d'un changement climatique et « *demandait notamment au PNUE, à l'OMM et à l'ICSU* :

- *De veiller à ce que des évaluations soient périodiquement entreprises de l'état des connaissances scientifiques en la matière, et de ses incidences pratiques; et*
- *De lancer, le cas échéant, le débat sur un projet de convention mondiale.* »

Ainsi, trois ans avant la création du GIEC et cinq ans avant le lancement de la CCNUCC, des esquisses de ces deux institutions étaient tracées.

Enfin, à Villach, Claude Lorius présenta la découverte, portant sur une période de 160 000 ans, de la relation entre le taux de CO₂ dans l'atmosphère et la température terrestre (Lorius et Carpentier, 2010, p. 48) ; soit deux ans avant sa publication dans la revue *Nature*. Puis, treize mois après cette publication, le GIEC a été mis en place, soit en novembre 1988.

Octobre 1985	Octobre 1987	Novembre 1988
Conférence de Villach, présentation de Lorius	Publication des résultats de Vostok	Création du GIEC

Néanmoins, nous aurions tort de considérer que la découverte de Vostok serait la cause de la création du GIEC. Cette dernière a résulté d'un processus, qui dura près de dix ans, dont le lancement est indépendant de la découverte de l'équipe de recherche de Lorius. Toutefois, ce processus a pu être conforté, voire accéléré par cette découverte majeure.

I.1.7.3 – GIEC ; CCNUCC ; Protocole de Kyoto

Les Références de la partie consacrée au Protocole de Kyoto sont, sauf précision contraire, trois sites web d'institutions publiques françaises²⁸.

²⁸ Texte du Protocole de Kyoto https://www.diplomatie.gouv.fr/IMG/pdf/Protocole_de_Kyoto_20100727.pdf.

En juin 1987, sous l'impulsion des États-Unis, la décision de la mise en place du GIEC a été prise par une résolution du Conseil exécutif de l'OMM. A ce sujet, nous pouvons lire S. Agrawala (1998, p.611 et 612) : « *La résolution 9 du dixième Congrès de l'OMM, qui s'est réuni en mai 1987, a reconnu la nécessité d'une approche interdisciplinaire et multi-agences et a demandé au Conseil exécutif de l'OMM "d'organiser des mécanismes appropriés pour entreprendre le développement des aspects scientifiques et autres de la question des gaz à effet de serre". Les États-Unis ont également fortement influencé la résolution du Conseil exécutif de l'OMM qui, une semaine plus tard, en réponse à l'appel du Congrès, demandait au Secrétaire général de l'OMM, "en coordination avec le Directeur exécutif du PNUE, d'établir un mécanisme intergouvernemental pour réaliser des évaluations scientifiques coordonnées au niveau international de l'ampleur, de l'impact et du calendrier potentiel des changements climatiques".* »²⁹. (VOA³⁰).

Il est à noter qu'entre 1985 et 1987 le Conseil international des unions scientifiques, l'ICSU, a été écarté du projet ; la volonté, notamment des États-Unis, était que le GIEC soit, à l'instar des organisations onusiennes, sous la seule responsabilité des gouvernements.

Un an après la décision du Conseil exécutif de l'OMM, la déclaration du G7 réuni du 19 au 21 juin 1988 à Toronto encourageait la « *création d'une commission intergouvernementale sur les changements climatiques mondiaux sous les auspices du Programme des Nations Unies sur l'Environnement et de l'Office Mondial de Météorologie* »³¹.

<https://www.vie-publique.fr/fiches/274835-quest-ce-que-le-protocole-de-kyoto> , vu le 2 avril 2022.

<https://www.insee.fr/fr/metadonnees/definition/c1667> , vu le 2 avril 2022.

29 Page 611.

30 « *The resolution 9 of the Tenth WMO Congress, which met in May 1987, recognized the need for an interdisciplinary and multi-agency approach and asked the Executive Council of WMO 'to arrange for appropriate mechanisms to undertake further development of scientific and other aspects of greenhouse gases'. The US also strongly influenced the WMO Executive Council resolution a week later, which in response to the call from the Congress, requested the Secretary General of WMO, 'in coordination with the Executive Director of UNEP to establish an intergovernmental mechanism to carry out internationally coordinated scientific assessments of the magnitude, impact and potential timing of climate change* »

Quelques mois plus tard, en novembre 1988, le GIEC était officiellement créé. Puis, le 8 décembre de la même année, l'Assemblée générale de l'ONU approuvait « *la décision prise par l'organisation météorologique mondiale et le Programme des Nations Unies pour l'environnement de créer conjointement un Groupe intergouvernemental de l'évolution du climat* »³².

L'adoption de la Convention cadre des Nations Unies sur les changements climatiques (CCNUCC) date du 9 mai 1992 (New-York)³³. Un mois plus tard, du 3 au 14 juin 1992, s'est tenu le troisième Sommet de la Terre, organisé à Rio par l'ONU. La CCNUCC fut intégrée dans les conclusions de ce Sommet, aux côtés de deux autres conventions (biodiversité et désertification). Elle entra en vigueur en 1994. Son article 2 en fixe l'objectif général : « *stabiliser [...] les concentrations de gaz à effet de serre dans l'atmosphère à un niveau qui empêche toute perturbation anthropique dangereuse du système climatique. Il conviendra d'atteindre ce niveau dans un délai convenable pour que les écosystèmes puissent s'adapter naturellement aux changements climatiques, que la production alimentaire ne soit pas menacée et que le développement économique puisse se poursuivre d'une manière durable.* » Cet article fixe donc un élément de cadrage politique qui, nous le verrons dans notre partie II, sera appliqué par le GIEC, lequel proposera des scénarios qui mènent à une stabilisation des concentrations de GES. Plus largement nous verrons que des interactions fortes opéreront entre les deux organisations.

La Convention est composée de 26 articles. Ceux-ci sont précédés d'une liste de constats dont certains, reproduits ci-dessous, reconnaissent la réalité d'un réchauffement climatique d'origine anthropique à venir, d'une part, et, d'autre part, font état d'une incertitude sur l'ampleur et la vitesse de ce changement. Cette incertitude est présentée de telle manière qu'il est laissé entendre

31 Paragraphe 33. Voir sur le site de l'université de Toronto :

<http://www.g8.utoronto.ca/francais/1988toronto/economique.html> . Vu le 5 novembre 2021.

Nous notons que les déclarations du G7 de 1986 et 1987 n'abordent pas le sujet.

32 <https://digitallibrary.un.org/record/54234?ln=fr>

33 https://unfccc.int/files/cooperation_and_support/cooperation_with_international_organizations/application/pdf/convfr.pdf

que le réchauffement pourrait être peu conséquent ou au contraire très conséquent. Voici ces constats extraits du texte de la CCNUCC :

« Les parties à la présente Convention,

Conscientes que les changements du climat de la planète et leurs effets néfastes sont un sujet de préoccupation pour l'humanité tout entière,

Préoccupées par le fait que l'activité humaine a augmenté sensiblement les concentrations de gaz à effet de serre dans l'atmosphère, que cette augmentation renforce l'effet de serre naturel et qu'il en résultera en moyenne un réchauffement supplémentaire de la surface terrestre et de l'atmosphère, ce dont risquent de souffrir les écosystèmes naturels et l'humanité,

(...)

Notant que la prévision des changements climatiques recèle un grand nombre d'incertitudes, notamment en ce qui concerne leur déroulement dans le temps, leur ampleur et leurs caractéristiques régionales (...) »

Les États (encore appelés parties) de la CCNUCC se réunissent chaque année, depuis 1995, lors d'une Conférence des parties (COP), encore appelée 'COP climat', laquelle est « l'organe décisionnel suprême de la Convention »³⁴.

Le 11 décembre 1997 à Kyoto, la COP3 de la CCNUCC adopta le Protocole de Kyoto³⁵. L'objectif global était une réduction d'au moins 5,2 % des émissions anthropiques des principaux gaz à effet de serre (Dioxyde de carbone (CO₂), Méthane (CH₄), Oxyde nitreux (N₂O), Hydrofluorocarbones (HFC), Hydrocarbures perfluorés (PFC), Hexafluorure de soufre (SF₆)) émis, sur la période 2008-2012 par rapport à 1990, par 38 pays industrialisés (les 16 pays de l'UE plus 22

34 <https://unfccc.int/fr/process/bodies/supreme-bodies/conference-of-the-parties-cop>

35 https://www.diplomatie.gouv.fr/IMG/pdf/Protocole_de_Kyoto_20100727.pdf

autres³⁶). A cette fin, des objectifs de réduction contraignants étaient fixés pour chacun de ces 38 pays, dont 8 % de réduction pour l'Union européenne (UE). Ce protocole est entré en vigueur le 16 février 2005, soit 90 jours après qu'avait été remplie la double condition requise, c'est-à-dire la ratification par au moins 55 États signataires de la CCNUCC, dont par un nombre d'États de la liste des 38 pays engagés à réduire leurs émissions, représentant collectivement en 1990 au moins 55 % des émissions de l'ensemble de ces pays. Le protocole ne sera pas ratifié par les États-Unis (opposition du Sénat) et sera rejeté par le Canada en 2011. « *Expirant fin 2012, ses objectifs semblent globalement avoir été atteints* ».

« *En 2012, la COP18 de Doha a permis de prolonger le protocole, soutenant l'objectif pour 37 pays industrialisés de réduire les émissions de gaz à effet de serre d'au moins 18 % (toujours par rapport à 1990), entre 2013 et 2020. Toutefois, des pays comme le Canada, la Russie ou le Japon se sont désengagés.* »

Finalement, en 2020, l'objectif de Doha était globalement atteint par les 37 pays engagés. Le Protocole de Kyoto a ainsi constitué une étape effective de la mobilisation politique internationale afin d'atténuer le changement climatique, malgré le désengagement de puissances industrielles. Mais ce n'était qu'une première étape. En effet, nous verrons qu'aujourd'hui, un nombre important et croissant de pays expriment un engagement bien plus ambitieux, atteindre l'objectif de neutralité carbone vers 2050, soit 100 % de réduction nette en trois décennies. Par ailleurs, le Protocole de Kyoto n'a pas empêché une augmentation importante des émissions globales de GES, en raison de l'essor industriel de pays tels que la Chine et l'Inde. Ainsi, la part des émissions de GES des 38 pays de la liste s'est réduite à seulement 36 % des émissions mondiales en 2010, contre au moins 50 % en 1990 ; pour partie en raison de la délocalisation, hors du territoire de ces 38 pays, de productions fortement émettrices de GES. Finalement, le bilan est une nette insuffisance du Protocole de Kyoto, ce que, Patricia Espinosa, secrétaire exécutive de l'ONU Changements climatiques, résumait, le 17 juin 2020, dans les termes suivants : « *Bien que les résultats de cette évaluation (des réductions d'émissions des pays engagés par l'Accord de Doha) soient très encourageants, ils ne s'appliquent qu'à un groupe de quelques 37 pays qui ont accepté des objectifs de réduction des émissions dans le cadre de l'amendement de*

36 États-Unis, Canada, Japon, Russie, Australie, Nouvelle-Zélande, Ukraine, Suisse, Norvège, Islande, Liechtenstein et 11 pays européens qui rejoindront par la suite l'UE.

*Doha. Cependant, les émissions mondiales ont augmenté, ce qui clarifie le besoin urgent d'une plus grande ambition. »*³⁷

I.1.8 – Conclusion

A partir du milieu du XIX^e siècle, et durant un siècle, le changement climatique a lentement émergé en tant qu'objet scientifique, avant de connaître un développement important après la Seconde Guerre mondiale, puis de franchir un premier seuil majeur, que nous pourrions qualifier de seuil d'alerte, en 1979, avec la publication du Rapport Charney, lequel répondait à une demande politique du Président des États-Unis.

Cinq ans auparavant, en 1974, l'Assemblée générale de l'ONU mettait à l'agenda politique international le changement climatique, mais toujours en tant qu'objet scientifique ; ce qui était un préalable à une possible mobilisation politique. Il deviendra un objet de mobilisation politique effective en 1992, avec la création de la CCNUCC, puis, et surtout, en 1997 avec la mise en place du Protocole de Kyoto ; étape tout à la fois historiquement importante et nettement insuffisante pour « *prévenir les changements climatiques qui seraient dus à l'activité de l'Homme et dont les effets seraient néfastes pour le bien-être de l'humanité* »³⁸.

37 <https://unfccc.int/fr/news/la-deuxieme-phase-du-protocole-de-kyoto-sur-la-reduction-des-emissions-est-atteignable-mais-une-plus> , vu le 5 avril 2022.

38 Extrait de la déclaration de la Première conférence mondiale sur le climat. Genève. 1979. Vu plus haut dans le texte.

Chapitre 2 – La bifurcation du système Terre : une imprévisibilité renforcée

Ce chapitre introduit dans la trame de notre thèse le contexte géologique et enrichit notre approche et notre évaluation de l'imprévisible.

Son apport est pour partie issu de notre Annexe1. Cette dernière résulte, d'une recherche dont l'objectif était de mieux saisir le changement climatique en cours en le situant dans la perspective de l'histoire longue des temps géologiques. Le changement climatique en cours est alors apparu comme indissociable d'une bifurcation du système-Terre et du vivant, une bifurcation aux évolutions futures largement imprévisibles. Ensuite, de cette recherche, qui revenait à intelligibiliser l'histoire du système Terre, l'hypothèse d'un nouvel éon, l'Anthropozoïque, s'est imposée.

Un second apport de ce chapitre résulte d'une analyse d'un aspect de la bifurcation en cours, à savoir la sortie de la période géologique du Quaternaire. Dans un premier temps, est exposée une série de faits concrets en relation avec le climat qui rompent avec le Quaternaire (sous-chapitre I.2.3). Dans un second temps, une démonstration logique de type mathématique prouve l'existence d'un risque d'emballement climatique inédit (sous-chapitre I.2.4).

I.2.1 – Présentation générale

Notre annexe 1, *Bifurcation vers l'éon Anthropozoïque, Émergences et imprévisibilité*, met en exergue le caractère d'imprévisibilité de la bifurcation en cours du système-Terre et corrélativement du système climatique et nous amène à penser le présent et le futur hors de la continuité de la période géologique du quaternaire, voire hors de la continuité de l'éon Phanérozoïque.

L'émergence de l'humanité puis son développement menant à l'anthropisation du système-Terre ouvrirait ainsi le cinquième éon du système-Terre, que nous nommons l'Anthropo-

zoïque ; tout comme, il y a environ un demi-milliard d'années, l'émergence des animaux, des champignons et des plantes vasculaires puis leur développement au sein d'un monde du vivant organisé en écosystèmes d'un nouveau type, que nous nommons écosystèmes phanérozoïques, avaient ouvert le quatrième éon du système-Terre, nommé le Phanérozoïque. Ainsi, aujourd'hui, tout comme il y a un demi-milliard d'années, le monde du vivant connaît une phase de réorganisation sous l'impulsion d'une émergence majeure en son sein, l'humanité. La conséquence en est une bifurcation géologiquement fulgurante vers un nouvel éon, l'Anthropozoïque.

A côté des conséquences inédites de l'apparition de l'humanité dans le système-Terre, il est à noter que l'humanité présente, en tant qu'espèce vivante, un niveau de complexité inédit, source d'émergences incessantes au rythme de plus en plus rapide. Cet univers hyper-complexe que constitue l'humanité opère actuellement une métamorphose, objet de la troisième partie de notre annexe1. Il est donc plus que jamais nécessaire de prendre pleinement en considération l'hyper-complexité de l'aventure humaine et sa part d'imprévisible.

Par conséquent, la réponse stratégique à la question '*Que faire maintenant ?*' ne peut guère s'envisager par la seule et indispensable investigation du passé et des évolutions historiques. En effet, elle exige de saisir les profondes transformations en cours et, autant que faire se peut, d'anticiper leur devenir. Elle exige aussi une position de flexibilité, indispensable pour faire face à la part d'imprévisibilité du futur et, au fil du temps, prendre en considération tout à la fois le développement de la connaissance de la réalité en devenir et la part mouvante du non connu et de l'imprévisible. Si la perspective historique est cependant une approche indispensable, elle ne peut se limiter aux seuls derniers siècles avant nos jours, mais doit se prolonger jusqu'à l'échelle la plus grande des temps géologiques, celle des éons, puisqu'il s'agit pour l'humanité de penser collectivement le nouvel éon, l'Anthropozoïque, que le vivant a ouvert avec l'émergence d'Homo-sapiens.

Enfin, dans notre Annexe 1 nous introduisons le concept de système bio-Terre, qui consiste en une conception du système-Terre où le vivant est placé au centre, en tant que moteur de l'histoire de ce système, et où le climat possède le statut de composante, aux côtés de l'atmosphère, des océans, des sols continentaux et du vivant.

I.2.2 - Hyper-complexité

L'humanité et le système-Terre ont en commun d'être des systèmes complexes où des émergences inédites et imprévisibles prolifèrent sans cesse et impactent l'état d'ensemble du système. C'est pourquoi à leur sujet nous parlerons d'hyper-complexité. La part d'imprévisible du futur y est particulièrement importante.

Les émergences inédites - inhérentes au vivant – y sont incessantes ; de surcroît, lors de périodes de bifurcations majeures. L'un de ces deux systèmes, à savoir l'humanité, est devenue une partie intégrante de l'autre, le système-Terre ; si bien que l'hyper-complexité du premier accroît notablement le niveau d'hyper-complexité et d'imprévisibilité du second.

L'humanité est aujourd'hui l'objet d'une bifurcation majeure et extrêmement rapide, au sujet de laquelle nous parlerons de métamorphose plutôt que de bifurcation. Il s'en déduit une amplification du haut niveau d'imprévisibilité du devenir du système-Terre et corrélativement du climat, y compris sur une courte échelle de temps. Si bien que toute tentative de prédiction climatique chiffrée relative à l'ensemble du XXI^e siècle serait vaine.

I.2.3 – Hors du Quaternaire

Nous verrons, dans le chapitre 2 de la partie II de notre thèse, que les modèles climatiques sur lesquels sont fondés les scénarios pour le XXI^e siècle publiés par le GIEC, reposent sur des données qui ne remontent pas au-delà de la période du quaternaire, c'est-à-dire pas au-delà de 2,6 millions d'années ; et même, sauf exception, pas au-delà de quelques dizaines de milliers d'années. Si bien que, pour notre étude rationnelle de la nature et de la portée scientifique de ces scénarios, limiter notre approche à la seule prise en considération de la sortie du Quaternaire s'avérera déjà fertile. Bien évidemment, prendre en considération le changement d'éon serait *a priori* plus puissant, mais serait aussi et surtout davantage marqué du sceau de l'imprévisible, voire du sceau de l'impensable ; notamment si nous portions notre regard sur un futur de long terme au-delà de la fin du XXI^e siècle.

I.2.3.1 – Quelques illustrations concrètes

Le processus de réchauffement climatique en cours se différencie très nettement des processus de réchauffement du quaternaire. Dans le cas présent, le réchauffement possède une origine anthropique et vient s'ajouter à un réchauffement de type quaternaire dont l'origine est orbitale (déclenché par un changement de configuration des paramètres orbitaux de la Terre) et qui était situé à son zénith, sinon qui en était proche.

I.2.3.1.1 – Les gaz à effet de serre

En particulier, le réchauffement actuel présente un taux de GES dans l'atmosphère aujourd'hui nettement plus élevé que jamais durant le Quaternaire. Par conséquent, la source globale de surplus d'énergie calorifique de l'atmosphère n'a plus la physionomie spatiale qu'elle avait lors des phases de réchauffement de la période du Quaternaire. Ce point devrait notamment avoir des conséquences sur les déplacements d'air (les vents), sur les déplacements et la répartition géographique dans l'atmosphère d'éléments ou composés chimiques et d'énergie, sur les déplacements d'eau dans les mers et les océans (les courants), et sur les déplacements et la répartition géographique dans les mers et océans du dioxyde de carbone, de l'oxygène, de l'énergie, etc., ainsi que sur la physionomie du système nuageux global. Finalement, ce taux inédit de GES dans l'atmosphère devrait éloigner ces déplacements, répartitions et physionomies de ce qu'ils ont pu être durant les phases de réchauffement du Quaternaire. Nous avons là l'une des causes d'une physionomie générale des rétroactions positives et négatives au changement climatique actuel qui devrait être différente de celle des réchauffements climatiques du Quaternaire.

I.2.3.1.2 – Les sols continentaux

En plus de la singularité de sa cause première, à savoir les émissions anthropiques de GES, le processus de réchauffement climatique en cours se différencie de ceux du Quaternaire en raison

d'un état des autres composantes du système bio-Terre jamais rencontré durant le Quaternaire. Ainsi, durant la période du Quaternaire les écosystèmes phanérozoïques en général et les forêts en particulier couvraient des étendues continentales bien plus importantes que de nos jours. La situation actuelle résulte (pour ce qui ne relève pas des conséquences du changement climatique) de l'anthropisation des sols par l'agriculture, les villes, les usines, les infrastructures, etc. Si bien que le rôle joué par les sols continentaux dans le système climatique n'est plus aujourd'hui identique à ce qu'il était durant le Quaternaire. Nous rappelons que les sols ont des interactions avec la composition de l'atmosphère et avec le climat qui dépendent fortement de la nature de leur couverture (voir des développements dans l'annexe 1).

I.2.3.1.3 – Le système nuageux

Le système nuageux actuel est différent de celui du Quaternaire, notamment en raison de sols, d'aérosols, de végétation terrestre et de vivant marin qui influencent le système nuageux et sont tous aujourd'hui différents de ce qu'ils ont pu être durant le Quaternaire. Or, le système nuageux joue un rôle majeur dans le fonctionnement du système climatique (précipitation, transfert de chaleur, effet de serre, albédo...), mais aussi un rôle majeur dans le fonctionnement du Monde du vivant et dans l'évolution des sols qui, l'un et l'autre à leur tour, jouent un rôle majeur dans le fonctionnement du système climatique. Nous avons là une illustration de la bifurcation du climat hors de son stade de la période géologique du Quaternaire.

I.2.3.1.4 – L'acidité des océans

Le taux de CO₂ dans l'atmosphère dépasse actuellement 420ppm, alors qu'il fluctuait entre 180ppm et 300ppm durant le Quaternaire, au moins au cours des derniers 800 000 ans du Quaternaire. L'une des conséquences est une augmentation de l'acidité des océans. Celle-ci contribue à une modification de l'environnement du vivant du marin qui constitue une rupture avec le Quaternaire. Or le vivant marin joue un rôle majeur dans la composition chimique de l'atmosphère (CO₂, O₂, etc.) et de là dans les équilibres et évolutions du climat (voir Annexe 1). Dans le sous-chapitre III.2.8, nous reviendrons largement sur cette rupture.

L'acidification des océans

Entre les océans et l'atmosphère s'effectuent des échanges de dioxyde de carbone (CO_2). C'est ainsi que de nos jours une partie des rejets anthropiques de dioxyde de carbone dans l'atmosphère, environ 30 %, est absorbée par les océans. Par ailleurs, la présence de CO_2 dans l'eau de mer s'accompagne de la présence d'acide carbonique H_2CO_3 . Plus précisément, la plupart des molécules de CO_2 restent stables dans l'eau, tandis qu'une faible part d'entre elles fusionnent avec une molécule d'eau (H_2O) et donne une molécule d'acide carbonique (H_2CO_3). C'est pourquoi, de nos jours et en raison d'une augmentation du taux de dioxyde de carbone dans l'atmosphère, l'acidité des océans augmente. Cette acidité fait peser une menace de disparition sur la grande part des coraux, modifie la croissance de certaines espèces de poissons, etc., avec des conséquences irréversibles sur les écosystèmes marins ; d'autant que ces derniers sont soumis à d'autres perturbations.

I.2.3.1.5 – Le vivant

L'état du Monde du vivant est inédit. Tout d'abord, en son sein a émergé un type de vivant d'une hyper-complexité inédite, à savoir l'humanité. Ensuite, ce nouveau vivant influence et transforme l'ensemble du Monde du vivant, sur les continents et dans les océans. Finalement, le monde du vivant n'est plus aujourd'hui celui du Quaternaire (disparition d'espèces ; pour les espèces non disparues, évolution du nombre de membres et de leur répartition géographique ; écosystèmes modifiés, déstabilisés ; etc.), si bien que le rôle actuel du vivant dans le système climatique ne peut pas se confondre avec ce rôle durant le Quaternaire. (Voir des développements dans l'Annexe 1 et dans le sous-chapitre III.2.8).

I.2.3.2 – Une dynamique de rétroactions inédite

Tout au long du Quaternaire - période géologique cyclique qui a débuté il y a environ 2,6 millions d'années - se sont succédé des phases glaciaires entrecoupées de réchauffements planétaires encore appelées déglaciations. Ces réchauffements étaient initiés par une modification des paramètres de Milankovitch de l'orbite terrestre qui se traduisait par une augmentation de l'insolation solaire, puis par un réchauffement dont, du moins pour les 800 derniers millénaires, on trouve aujourd'hui la trace dans les calottes glacières polaires. Puis, quelques temps plus tard, le taux de CO₂ dans l'atmosphère, ainsi que le taux de deux autres principaux GES, le méthane et le protoxyde d'azote (N₂O), amorçaient une augmentation. Il faut aussi noter d'autres rétroactions positives, notamment une baisse de l'albédo terrestre suite à la diminution des surfaces terrestres ou océaniques couvertes de glace. Un processus de réchauffement global et de déglaciation était ainsi enclenché. Cette fois ci, comme nous venons de le voir, le réchauffement

n'est pas initié par les paramètres de Milankovitch mais par l'activité humaine. Il est donc d'une autre nature et le climat sort de la forme qu'il avait durant le Quaternaire.

Vu que depuis au moins 800 000 ans, toute élévation de la température terrestre consécutive aux évolutions des paramètres de Milankovitch est suivie, par rétroaction positive du système-Terre, d'une élévation des taux de dioxyde de carbone, de méthane et de protoxyde d'azote dans l'atmosphère, nous pourrions être tentés d'en déduire que toute élévation de la température terrestre entraîne un déséquilibre entre les puits et les sources naturels de ces deux GES en faveur des sources, et que, par conséquent, le réchauffement qui s'accélère de nos jours ouvrira une période durant laquelle nous assisterons à un surplus naturel de ces deux GES, et de là à un surplus de réchauffement climatique. Cependant, un tel raisonnement repose sur l'omission de la nature inédite du réchauffement actuel, hors du cadre du Quaternaire. Il semble donc indispensable, avant de parvenir à des conclusions, de mener un travail d'exploration du système bio-Terre et de son climat tels qu'ils se présentent en ce XXI^e siècle, à la sortie du Quaternaire.

Tout d'abord, au cours du réchauffement actuel, les augmentations des taux des GES - et corrélativement les augmentations de la température moyenne globale – sont bien plus rapides que celles des réchauffements climatiques du Quaternaire. La contribution du Groupe de travail 1 du GIEC (GT1) au 6^e Rapport d'évaluation (RE) précise ce point : « *Les taux de variation du CO₂ et du CH₄ atmosphériques au cours du siècle dernier ont été respectivement (avec un haut degré de confiance) au moins 10 et 5 fois plus rapides que les taux maximum de croissance moyenne sur un siècle de ces gaz au cours des derniers 800 milles ans.* »³⁹ (VOA)⁴⁰. Nous avons ici un caractère de rapidité inédit, et donc fortement imprévisible par la science. Pour illustrer cette imprévisibilité, nous notons que la capacité d'adaptation du vivant s'en trouve affaiblie ou, plus exactement, s'en trouve et s'en trouvera sollicitée fortement et de façon inédite. Dès aujourd'hui, elle est déjà bien plus sollicitée que lors des réchauffements du Quaternaire et

39 Section 5.1.2.2, page 221.

40 « *There is high confidence that the rates of atmospheric CO₂ and CH₄ change during the last century were at least 10 and 5 times faster, respectively, than the maximum centennial growth rate averages of those gases during the last 800 kyr* ».

le sera encore davantage dans l'avenir, au moins dans les prochaines décennies. Si bien que le vivant pourrait plus que jamais donner lieu à des émergences inédites et imprévisibles. Par exemple, l'apparition de nouveaux champignons pourraient occasionner des ravages de végétations ou d'écosystèmes (confer notre annexe 4), avec *in fine* une réduction de la captation de CO₂ et donc une intensification du changement climatique.

Sur un autre plan, un élément semble pouvoir nous rassurer. Durant le Quaternaire, un décalage temporel important se présentait entre le réchauffement initial du climat et l'augmentation consécutive à ce réchauffement des taux de GES dans l'atmosphère ; augmentation due à un déséquilibre entre sources et puits de ces GES, en faveur des sources. A ce sujet, la contribution du GT1 au 4^e RE précise : « *Les variations du CO₂ au cours des 420 derniers millénaires ont été largement précédées par la température antarctique, généralement de plusieurs siècles à un millénaire.* »⁴¹ (VOA⁴²). Si bien que nous pourrions être tentés d'en déduire que d'ici la fin du XXI^e siècle (qui est le cadre de notre thèse), ce déséquilibre entre sources et puits de GES et ses conséquences sur le climat devraient être quasiment marginaux ; du moins si tout se passait comme durant le Quaternaire.

Voyons donc maintenant où en est aujourd'hui ce déséquilibre entre sources naturelles et puits naturels de GES. 'Naturel' est ici le terme employé par les climatologues. Il s'oppose à 'anthropique' et s'applique aux émissions (sources) et aux captations (puits) qui ne sont pas le fait direct de l'activité humaine. La cause initiale du changement climatique actuel se situe au cœur même de la mécanique équilibre/déséquilibre entre les sources et les puits de CO₂ et de CH₄ qui fonde la principale rétroaction climatique. En raison de cette rétroaction, le taux de CO₂ variait durant les 800 derniers milles ans du Quaternaire entre 180 et 300ppm. Or il atteint aujourd'hui plus de 420ppm. Quant au taux de CH₄, il variait dans le même temps entre 400 et 700ppb⁴³. Il atteint aujourd'hui une valeur proche de 1900ppb. Les émissions anthropiques de ces deux GES

41 Section 6.4.1, page 444.

42 « *Variations in CO₂ over the last 420 kyr broadly followed antarctic temperature, typically by several centuries to a millennium* ».

43 Partie par milliard, c'est-à-dire nombre de molécules de méthane dans l'atmosphère pour un milliard de molécule d'atmosphère sec.

n'auraient-elles pas perturbé la mécanique de la rétroaction de ceux-ci ? Si oui, de quelle manière ? Avec quelles conséquences ?

Les émissions anthropiques ont eu pour conséquence une plus grande activité des puits naturels (4^e RE, 2007, GT1, section 2.3.1, p.139 ; Ballantyne *et al.*, 2012) ; notamment, pour ce qui est du dioxyde de carbone, les puits que constituent les océans et la végétation terrestre. Par contre, ces émissions anthropiques n'ont eu que peu d'effet sur les sources naturelles. Ainsi, un déséquilibre entre les puits naturels et les sources naturelles se présente depuis l'amorce de l'actuel changement climatique. Cependant, et bien heureusement, jusqu'à aujourd'hui ce déséquilibre est inverse à ce qu'il était durant le Quaternaire ; à savoir, l'activité des puits naturels a fortement augmenté (rétroaction négative à un surplus de ces deux GES) alors que l'activité des sources naturelles n'a que peu varié. Sinon, les taux de ces deux GES auraient été aujourd'hui bien supérieurs à ce qu'ils sont. Ainsi, le taux de méthane dans l'atmosphère, aujourd'hui proche de 1900ppb, aurait dépassé ce chiffre de plusieurs milliers de ppb⁴⁴. Néanmoins, à bas bruit, la rétroaction climatique positive de type quaternaire opère à bas bruit (augmentation de l'activité des sources). Cependant, elle est actuellement cachée par l'augmentation bien plus importante de l'activité des puits.

Mais la situation n'est pas stabilisée. En particulier, nous avons une érosion des capacités des puits de carbone (les puits de CO₂ et de CH₄). Ainsi, en ce qui concerne le dioxyde de carbone, la capacité d'absorption de ce gaz par les océans a décliné et continuera à décroître suite à l'absorption du dioxyde de carbone d'origine anthropique durant des décennies. En d'autres termes, nous assistons à un épuisement progressif du puit de dioxyde de carbone que constitue l'océan.

44 Si les puits de méthane n'avaient pas modifié la quantité de méthane qu'ils capturent ou plus précisément qu'ils détruisent, alors depuis vingt ans le taux de méthane augmenterait d'environ 100 ppb par an. En effet, chaque année les puits captent environ 10 % du méthane présent dans l'atmosphère (les chiffres utilisés dans cette note de bas de page sont issus de nos sous chapitres III.2.1 et III.2.2). Or le taux de méthane dans l'atmosphère a augmenté en raison des activités humaines d'environ 1000ppb depuis l'époque pré-industrielle. Corrélativement, les puits de méthane capturent chaque année environ 100ppb de plus qu'avant l'époque pré-industrielle.

Ainsi, sur les 20 dernières années, si les puits de méthane n'avaient pas augmenté la quantité de méthane qu'ils capturent, alors l'augmentation du taux de méthane dans l'atmosphère aurait été supérieure d'environ 2000 ppb à ce qu'elle a été effectivement. Étendre ce calcul à la période allant de l'année 1750 à aujourd'hui donnerait un résultat très largement supérieur.

En ce qui concerne le méthane, dans le cas où l'augmentation de son taux dans l'atmosphère se poursuivrait, sa durée de vie moyenne dans l'atmosphère devrait s'allonger.

Deux conséquences se présentent.

Tout d'abord, les émissions anthropiques futures, si elles se poursuivaient, seraient de moins en moins captées par les puits. Si bien que pour une même quantité d'émission, nous aurions un impact sur les taux qui irait en croissant avec le temps.

Ensuite, si les rétroactions climatiques positives des sources naturelles de GES de type quaternaire prenaient de l'ampleur, le retardement et l'atténuation de leurs effets par les puits de carbone naturels seraient notablement plus faibles que durant le Quaternaire. Si bien que ces rétroactions climatiques se traduiraient par une augmentation des taux de GES plus précoce, plus ample et plus rapide que durant le Quaternaire, et donc par un surplus de réchauffement climatique qui serait de même plus précoce, plus ample et plus rapide. Ainsi, nous aurions tort de considérer que les rétroactions positives qui se développent actuellement à bas bruit, ne pourront pas, demain, y compris durant le XXI^e siècle, avoir des conséquences sur les taux de ces gaz, possiblement bien supérieures à ce qu'elles étaient durant le Quaternaire⁴⁵.

Plus généralement, rien ne permet d'affirmer, bien au contraire, que les rétroactions positives au réchauffement climatique actuel (CO₂, CH₄, vivant...) seront similaires, dans leur temporalité et leurs conséquences, à celles du Quaternaire. En effet, l'actuel réchauffement d'origine anthropique est en soi distinct des réchauffements du Quaternaire (voir le développement ci-dessus ainsi que plus haut la section I.2.3.1). En outre, ce réchauffement se greffe sur un système Terre qui est sorti du Quaternaire et duquel il est indissociable, ce que nous avons vu plus haut, notamment à propos des sols continentaux et du vivant.

Pour conclure, nous ne disons pas que les rétroactions positives des GES carbonés au réchauffement climatique dépasseront en amplitude celles du Quaternaires, ni même qu'elles iront au-delà d'un développement à bas bruit guère très conséquent. Par contre, sur la base de notre Annexe 1, renforcée par notre chapitre III.2 et par notre développement ci-dessus, nous notons que l'inédit et l'imprévisible sont ici des caractères dominants, et que l'hypothèse selon laquelle des

45 Voir section III.2.1.3 – Sortie des rails.

rétroactions positives des GES carbonés entraîneraient, éventuellement enclenchées et prenant une ampleur dès le XXI^e siècle, une sur-augmentation notable des taux de ces GES au-delà, voire bien au-delà, de l'amplitude des augmentations des taux de GES durant les déglaciations des derniers 800 000 ans du Quaternaire n'est pas à exclure.

Chapitre 3 – L'imprévisible : de l'enchantement et de la quantophrénie

Dans ce chapitre, nous nous pencherons sur le contexte idéologique dans lequel s'inscrivent les travaux du GIEC. Tout d'abord, nous présenterons un développement autour du concept de quantophrénie. Puis nous exposerons brièvement trois approches du changement climatique ou d'un objet englobant le changement climatique ; trois approches, sources de controverses scientifiques, où l'imprévisible est exclu ou en partie exclu du champ de vision. La première est l'hypothèse Gaïa, dont l'objet est le système-Terre, qui élimine une part de l'imprévisible de ce dernier à l'aide d'un réenchantement du monde. La deuxième est une catégorie de la géo-ingénierie climatique, dont l'objet est le changement climatique, qui repose sur une absence de prise en considération de l'hyper-complexité et de l'imprévisibilité du système-Terre. La troisième est une collapsologie, dont l'objet est le système-Terre et l'humanité, qui repose sur une absence de prise en considération de l'hyper-complexité et de l'imprévisibilité de l'humanité. Finalement, ce chapitre éclaire par des exemples un contexte idéologique où règnent la quantophrénie, des représentations dé-complexifiées d'objets hyper-complexes et un déni de l'imprévisible. Dans la suite de notre thèse, nous allons observer le déploiement d'une dynamique scientifique et politique relative au changement climatique qui n'a pas échappé à ce contexte, mais qui, au contraire, y a trouvé un ancrage. Enfin, nous aurions pu présenter dans ce chapitre l'Empreinte écologique. Nous avons choisi de la placer dans notre quatrième partie, car l'étude que nous en faisons est largement nourrie du contenu du chapitre 2 de notre prochaine et troisième partie.

I.3.1 – La quantophrénie

Selon la définition que nous avons posée en introduction, la quantophrénie est la tendance à limiter les représentations des phénomènes ou des objets aux seules représentations quantifiées, à nourrir les processus de décision politique de ces seules représentations quantifiées, et à large-

ment utiliser des critères quantitatifs comme outils de la mise en œuvre et de l'évaluation des politiques publiques et du travail (Supiot, 2015 ; Bocquet et al., 2018 ; David Demortain, 2019).

Dès le XIXe siècle, la question de la mathématisation (qui recouvre les formalismes 'quantifiés' et 'non quantifiés'⁴⁶) de la sociologie est l'objet de débats qui, au XXe siècle, se sont étendus à l'ensemble des Sciences humaines et sociales (SHS) (Olivier Martin, 2002). L'un de ses contempteurs les plus ardents est l'inventeur du terme 'sociologie,' Auguste Comte (1798 – 1857), lequel estimait « *que l'idée selon laquelle tout savoir positif est mathématisé est un préjugé métaphysique résultant de la forme qu'ont prise les premières sciences (astronomie, mécanique...)* » et « *que la société et l'homme en société sont trop complexes et pas assez inertes pour pouvoir faire l'objet d'une science mathématisée ou d'analyses statistiques.* » (Martin, 2002, p.4). A l'opposé nous avons, dès la fin du XVIIIe siècle, Nicolas de Condorcet (1743 – 1794) qui « *en forgeant la notion de « mathématique sociale », marquait sa volonté d'introduire la mesure dans les sciences sociales et, surtout, de bâtir une science générale des faits humains fondée sur la science mathématique* » (p.3).

A la suite de la Seconde Guerre mondiale, les développements de la puissance des ordinateurs et de la modélisation mathématique ont ouvert la voie à un déploiement de l'usage des approches quantitatives dans des domaines ou pour des questions où elles étaient auparavant inutilisables. Toutefois, cette utilisation élargie n'est pas neutre. Par exemple, elle peut être mise au service du contrôle politique des populations. Ainsi, « *Les mesures quantitatives sont un mécanisme clé pour simplifier, classer, comparer et évaluer, ce qui est au cœur du pouvoir disciplinaire* » (Espeland & Stevens, 2008 : p.414), (VOA⁴⁷). Par ailleurs, des aspects du réel peuvent être soustraits du regard et finalement non pris en compte dans des processus de décision et d'évaluation ou encore de prospection. Dès la fin des années 1960, la sociologue étasunienne Ida Hoos alerta sur des aspects sociaux majeurs qui n'étaient pas pris en compte dans l'évaluation quantifiée du déploiement de nouvelles technologies. Nous lui devons cette formule : « *Ce qui ne peut être compté ne compte tout simplement pas, et nous ignorons donc systématiquement des grands et importants domaines de préoccupation. D'autre part, nous faisons parfois*

46 Exemples de formalismes mathématiques non quantifiés : les théories des groupes, des jeux, des réseaux et des graphes ; l'algèbre de Boole ou encore la théorie des ensembles et la topologie générale.

47 « *Quantitative measures are a key mechanism for the simplifying, classifying, comparing, and evaluating that is at the heart of disciplinary power* ».

apparaître des chiffres à partir d'hypothèses afin de pouvoir effectuer des calculs. Une fois inclus, ces chiffres deviennent des 'données concrètes', que l'on peut facilement confondre avec des 'faits'. » (Hoos, 1979, p.193), (VOA⁴⁸). Ce propos d'Ida Hoos portait sur l'aval (les conséquences) d'un phénomène, en l'occurrence l'évaluation de la diffusion d'une technologie ou de l'application d'une politique publique.

Quantification et mathématisation sont aussi utilisées en amont de la mise en œuvre de politiques publiques. Dès la fin du XIXe siècle, elles furent convoquées pour contribuer à des processus de décisions politiques. Nous prenons pour exemple le contexte du génie civil étasunien au XIXe siècle, à propos duquel « *Ted Porter avait montré que le recours à la quantification et aux outils mathématiques est un moyen permettant aux ingénieurs américains des ponts et chaussées dont l'autorité n'était pas encore assurée de fonder cette autorité sociale et scientifique (Porter, 1995). En se mathématisant, les critères de décision devenaient explicites et publics : ils assuraient ainsi une certaine objectivité aux décisions.* » (Martin, 2002, p.10). Un autre exemple est celui de la *gouvernementalité du vivant* : « *La sociologie des nombres nous enseigne qu'une manière de construire une crédibilité et une légitimité politique au XIX^e siècle a consisté à objectiver un fait par des mesures. Trust in numbers nous dit l'historien des sciences Theodore Porter dans un ouvrage consacré à ce rôle déterminant joué par les nombres et les statistiques en politique (Porter, 1995). Or si cette quantification est semée d'embûches, c'est la construction d'une fragilisation décisionnelle qui en découle. Montrons comment la biodiversité va vite apparaître à la fois indénombrable et non mesurable et comment les enjeux politiques de la biodiversité finiront dans la pénombre des nombres.* » (Devictor, 2021, p.29).

Dans le cadre de notre thèse, nous allons montrer, à l'instar de Ted Porter, comment la quantification et la mathématisation contribuent à un processus de décisions politiques. Nous verrons, en particulier, que dans le cas de la quantification du futur du changement climatique, et plus

48 « What cannot be counted simply doesn't count, and so we systematically ignore large and important areas of concern. On the other hand, we sometimes conjure numbers out of assumptions so that we can make calculations. Once included, they become 'hard data', easily to be confused with 'facts'. »

généralement de la quantification d'un phénomène futur - ou du futur d'un phénomène - ancré dans un système hyper-complexe, alors, reprenant les mots d'Ida Hoos, l'imprévisible constitue un *grand et important domaine systématiquement ignoré*.

Par ailleurs, l'étude de situations de quantophrénie menée par Ida Hoos concernait la quantification de phénomènes ou objets des SHS, alors que, dans notre thèse, il s'agit essentiellement de la quantification de phénomènes ou objets du domaine des Sciences naturelles (SN). Nous notons que ces dernières bénéficient d'une image de *Sciences exactes* qui peut parfois nuire à l'exercice de l'esprit critique à leur endroit et à la capacité à détecter d'éventuels travers issus de la quantification - ou plutôt du mésusage de la quantification - exposés plus haut dans le propos d'Ida Hoos : que ce soit 'l'ignorance systématique de grands et importants domaines' (dans notre thèse 'les phénomènes situés dans le *Reste causal*' ou encore 'l'imprévisible') ou la confusion entre 'des faits' et 'des chiffres apparus à partir d'hypothèses' (dans notre thèse les scénarios climatiques pour le XXI^e siècle).

I.3.2 – L'Hypothèse Gaïa

Nous proposons ici quelques considérations sur l'Hypothèse Gaïa présentée en 1969 par James Lovelock. Sous cette Hypothèse, J. Lovelock, à l'opposé des modélisateurs du climat dont les travaux se développaient depuis le milieu des années 1950, ne rejette pas dans un *Reste* nombre de phénomènes causaux potentiellement conséquents. Tout au contraire, il aborde son objet d'étude, le système-Terre, dans sa complexité et prend en considération la part de ce système scientifiquement inconnue ou imprévisible. Toutefois, cette prise en considération s'accompagne d'une conception de l'inconnu et de l'imprévisible qui repose sur un dogme et un certain réenchancement du monde qui bornent, limitent l'inconnu et l'imprévisible.

Selon James Lovelock, l'Hypothèse Gaïa s'est imposée à lui en 1967⁴⁹ ; puis en 1969 il en fit une première présentation publique, lors d'un séminaire à Princeton, États-Unis⁵⁰. En 1979, il

49 Lovelock, 1979, p.30.

50 Lovelock, 1979, p.31.

publia le livre *Gaïa, a new look at life on Earth*. Il y définit l'Hypothèse Gaïa comme « (...) suggérant que la matière organique, l'air, les océans, et la surface de la Terre forment un système complexe susceptible d'être appréhendé comme un organisme unique et ayant le pouvoir de préserver les caractéristiques vitales de notre planète » (Lovelock, 1979, p.16-17). De cette hypothèse, nous observerons plus particulièrement l'idée selon laquelle ce système complexe, le système Terre, était « susceptible d'être appréhendé comme un organisme unique et ayant le pouvoir de préserver les caractéristiques vitales de notre planète ». Dans l'annexe 1 de notre thèse, nous avons noté que dans l'Hypothèse Gaïa la notion d'« organisme unique et ayant le pouvoir de préserver les caractéristiques vitales de notre planète » est particulièrement floue et élastique, qu'elle relève davantage du mythe que de la science, et qu'elle a pu parfois freiner la prise de conscience de la nature et de la hauteur des risques environnementaux. Cependant, dans le même temps, elle a motivé ou stimulé certaines recherches qui se sont avérées fécondes.

Au-delà de l'éventualité selon laquelle James Lovelock aurait, consciemment ou non, souhaité développer une théorie apportant quelques satisfactions à la Shell Research Limited qui finançait ses travaux de recherche⁵¹, nous pouvons faire la conjecture selon laquelle l'Hypothèse Gaïa répondait à un besoin d'enchanter ou ré-enchanter le monde par l'intuition ou la croyance en une « puissance supérieure, mystérieuse » (M. Weber, 1917), celle de l'« organisme unique et ayant le pouvoir de préserver les caractéristiques vitales de notre planète ». Pour conforter l'Hypothèse Gaïa, c'est-à-dire l'hypothèse de l'existence de cet organisme mythique, dans son ouvrage James Lovelock multiplie les développements qui tendent à montrer que « le climat et les propriétés chimiques de la Terre, aujourd'hui et tout au long de son histoire, semblent avoir toujours été optimales pour la vie. », ce qu'il commente en ces termes : « Qu'un tel phénomène soit fortuit est aussi probable que le fait de sortir indemne d'une promenade les yeux fermés dans les rues de la ville à une heure de pointe. ». En particulier, il fait un développement où il minimise les risques et dommages des pollutions industrielles⁵², en raison de la capacité supposée de Gaïa à absorber ces pollutions.

51 Op. cit., page 29 : James Lovelock y développe un argumentaire affirmant l'existence de son indépendance acquise, selon lui, grâce au financement de ses travaux de recherche par la Shell Research Limited.

52 Op. cit. Par exemple pages 142 et 143.

Pour compléter notre propos, nous notons que dans cet ouvrage James Lovelock posait des limites à l'enchantement du monde, c'est-à-dire à l'Hypothèse Gaïa. En particulier, il accordait au vivant marin et à l'Inconnu inconnu une place de première importance et alertait les humains sur la nécessité de prendre les plus grandes précautions à l'égard des océans.⁵³ Enfin, il considérait que Gaïa cherchait des conditions 'optimales pour la vie' et non pas pour l'humanité. Ainsi, le passage⁵⁴ de l'ouvrage consacré au nucléaire proposait une démonstration de l'absence de menace venant du nucléaire sur la pérennité du vivant, et ne s'arrêtait guère sur les risques pour les êtres humains et *a fortiori* pour l'humanité.

Enfin, dans *Gaïa, a new look at life on Earth*, le monde enchanté de J. Lovelock ne peut se confondre avec celui de M. Weber. Celui de M. Weber est basé sur une puissance supérieure « imprévisible » qu'il s'agit d'implorer et de tenter de maîtriser à l'aide de moyens magiques ; ainsi les croyances religieuses ne réduisaient pas l'imprévisible, mais situaient ce dernier sous le pouvoir divin. Celui de J. Lovelock est lui aussi basé sur une puissance supérieure ; mais une puissance largement prévisible, elle « *préserve les qualités vitales de notre planète* » et réduit ainsi le caractère imprévisible du système bio-Terre. Une puissance que nous ne saurions espérer maîtriser ni implorer à l'aide de moyens magiques ; d'autant que sa finalité serait des conditions optimales pour le vivant, et non pas pour l'humanité.

I.3.3 - Géo-ingénierie

Le dos au mur, l'humanité se doit d'agir sur le devenir du système bio-Terre (monde du vivant, atmosphère, océans, sols continentaux, climat)⁵⁵. Forts de ce constat, certains promoteurs de projets de géo-ingénierie visent une modification de la composition chimique de l'atmosphère ou des océans à coups de diffusions massives de produits chimiques. Une première approche scientifique montre que ces projets devraient réduire notablement le rayonnement solaire parvenant à la surface terrestre, pour les uns, ou, pour les autres, augmenter notablement la capture de dioxyde de carbone par les océans. Cependant, il s'agit d'approches quantifiées qui ne prennent

53 Op. cit., page 126, pages 141 à 143, tant à propos du vivant marin que de l'Inconnu inconnu.

54 p.36-37.

55 Confer Annexe 1.

en considération qu'un nombre limité de phénomènes qui, certes, peuvent sembler satisfaisantes dans un contexte de quantophrénie. Mais il y a l'hyper-complexité du système bio-Terre, renforcée par un contexte de bifurcation majeure, qui se traduit par une incapacité de la science à prévoir la réaction du monde du vivant et plus largement la réaction du système bio-Terre que la mise en œuvre de tels projet engendrerait. Des basculements imprévisibles pourraient se produire, dont les conséquences sur l'espèce humaine seraient tout aussi imprévisibles.

En 2006, Le prix Nobel de chimie Paul Josef Crutzen publia un article *L'augmentation de l'albédo par des injections de soufre dans la stratosphère : Une contribution à la résolution d'un dilemme politique ?* (Crutzen, 2006). En raison de la notoriété du chimiste néerlandais, ce papier eut une résonance notable dans les sphères scientifiques et politiques. Il s'en est suivi une intensification des recherches en géo-ingénierie climatique et une importance accrue de ces techniques sur l'agenda politique (Boettcher M et al., 2017). Cependant, le propos de cet article de P. Crutzen pouvait sembler prudent, puisque l'accent y était mis sur les recherches à propos « des conséquences environnementales » (voir extraits ci-dessous). Mais à y regarder de plus près, c'est l'imprudence qui apparaît comme la caractéristique de cet article. Cette imprudence résulte d'une croyance selon laquelle les conséquences environnementales d'une telle géo-ingénierie globale pourraient être suffisamment étudiées *a priori* pour éventuellement se conclure positivement. Nous sommes ici devant un cas où un scientifique de très haut niveau dans un champ disciplinaire donné montre une incompréhension de la nature de la complexité du vivant et du système bio-Terre. C'est ainsi que P. Crutzen commet une sous-estimation majeure de l'imprévisibilité du risque de bouleversement ou bifurcation de ce système - royaume de l'émergence, de l'inédit et de l'irréversible - que le recours à ce type de géo-ingénierie climatique pourrait enclencher. Enfin, nous n'exprimons ici aucune réserve à l'égard de recherches sur « les conséquences environnementales » d'une technique de géo-ingénierie telle que celle qui est l'objet de l'article de P. Crutzen ; par contre nous alertons sur l'objectif que le prix Nobel de chimie donne à ces recherches.

Extraits de l'article de P. Crutzen (2006) : *L'augmentation de l'albédo par des injections de soufre dans la stratosphère : Une contribution à la résolution d'un dilemme politique ?*

« Étant donnée la réaction politique internationale extrêmement décevante face aux réductions d'émissions de gaz à effet de serre requises, et compte tenu des résultats alarmants de certaines études récentes (...), les recherches sur la faisabilité et les conséquences environnementales de géo-ingénieries climatiques du type présenté dans ce document, qui pourraient devoir être déployées à l'avenir, ne devraient pas être taboues ». [p. 214]. « Néanmoins, je dois à nouveau souligner ici que le programme de renforcement de l'albédo ne devrait être déployé que dans le cas où il existerait des avantages nets avérés et, en particulier, où un réchauffement rapide se développerait. Il est important que sa possibilité ne soit pas utilisée pour justifier des politiques climatiques inadéquates, mais simplement pour créer une possibilité de combattre un réchauffement climatique potentiellement dramatique. » [p. 216].

En 2013, dans son 5^e rapport d'évaluation, pour la première fois le GIEC s'exprima sur la géo-ingénierie. Il reprit la classification courante de celle-ci en deux catégories⁵⁶ :

- Les techniques de gestion ou contrôle des rayonnements solaires atteignant la Terre (SRM, acronyme anglais de Solar Radiation Management). Parmi celles-ci se trouve l'injection de soufre dans la stratosphère qui réfléchit une partie de la lumière émise par le soleil (technique mise en avant par P. Crutzen) ;

- Les techniques d'élimination du dioxyde de carbone (CDR, acronyme anglais de Carbon Dioxide Removal). Parmi elles se trouve la diffusion de limailles de fer dans les océans qui entraîne, le temps de la présence de cette limaille, une multiplication des phytoplanctons consommateurs de dioxyde de carbone (CO₂) et émetteurs d'oxygène (O₂).

⁵⁶ Voir par exemple *Geoengineering the climate: science, governance and uncertainty*, rapport de la Royal Society, 2009, sous la direction de John Shepherd. (<https://royalsociety.org/topics-policy/publications/2009/geoengineering-climate/>).

Dans le résumé à l'intention des décideurs rédigé par le groupe 1, le propos du GIEC se conclut sur l'existence « d'effets secondaires indésirables » et de « conséquences à long terme à l'échelle du globe ». Il précise que les techniques de contrôle du rayonnement solaire entraîneraient une modification du « cycle mondial de l'eau », puis il souligne leur caractère inopérant contre « l'acidification des océans. ». Le rapport complet présente des développements plus conséquents. En particulier y sont listés des risques liés aux techniques d'élimination du dioxyde de carbone via la diffusion de produits chimiques dans les océans : extension des régions océaniques anoxiques (où la présence d'oxygène est faible ou inexistante) ; augmentation des émissions de protoxyde d'azote (un puissant gaz à effet de serre) ; acidification des océans profonds ; perturbation des écosystèmes marins⁵⁷.

En 2014, dans un ouvrage collectif, *Geoengineering of the climate system*, Alan Robock énonce une série d'effets connus et quantifiés de la technique d'injection d'aérosols dans la stratosphère (SRM) : appauvrissement de la couche d'ozone stratosphérique, diminution des précipitations mondiales moyennes et en particulier dans les régions de mousson, blanchiment du ciel, réduction de l'énergie solaire arrivant au sol, radiations diffuses. Il est à noter que l'ensemble de ces effets perturberait fortement le monde du vivant et donc le système bio-Terre ; cependant, ceci n'est pas signalé par A. Robock. Toutefois, il cite, sans autres précisions, des « conséquences imprévues », des « inconnues non connues » et du « non quantifiable ». (Robock, 2014).

I.3.4 - Une collapsologie bien peu complexe

Nous définissons la collapsologie comme la théorie qui repose sur le postulat selon lequel *Un effondrement mondial serait inéluctable dans les prochaines décennies, sinon très probable*. De nombreux prosélytes de cette théorie ne prennent pas en compte l'hyper-complexité de l'humanité, et font fréquemment appel⁵⁸ à des scénarios pseudo-scientifiques qu'ils présentent comme des productions scientifiques, tirant ainsi abusivement profit de l'aura de la science ; nous les

57 5^e rapport d'évaluation du GIEC, Groupe 1, p.547, table 6.14.

58 Voir par exemple, *Effondrement de la civilisation ?* Pablo Servigne, <https://www.youtube.com/watch?v=5xziAeW7l6w>

nommerons les *collapsonautes quantophrénistes*. Parmi ces scénarios, se trouvent notamment ceux du rapport Meadows, *The limits to Growth*, publié en 1972 par le Club de Rome. Le rôle historique de lanceur d'alerte joué par le Club de Rome est remarquable et l'importance des questions posées dans le rapport Meadows est indéniable : croissance démographique ; industrialisation accélérée ; pollutions croissantes ; raréfaction des ressources non renouvelables ; agriculture, malnutrition et menace de famine. Cependant, cela ne procure en rien une légitimité scientifique aux scénarios quantophréniques de ce rapport qui, tout en étant conçus à grand renfort de mathématiques, présentent un *Reste causal* très conséquent et plus largement des biais majeurs dont (Élodie Vieille Blanchard, 2011, p. 415-428) :

- Une conception du futur selon une simple continuité du passé.
- Une représentation de l'humanité à l'image de l'Occident.
- Une omission de larges pans déterminants de la réalité : par exemple de la réaction des sociétés face à des menaces perçues comme telles ; de la variation des prix, face à une raréfaction de certaines ressources, et de son influence sur l'affectation des ressources, sur les choix de consommation et de production, et sur le développement de produits de substitution ; etc.
- des choix arbitraires dont l'objectif est de parvenir à la conclusion recherchée, en particulier lors de l'écriture des équations qui représentent les relations entre les variables.

Enfin, les propos suivants de Michel Godet et Philippe Durance peuvent particulièrement bien s'appliquer aux scénarios, tels ceux du rapport Meadows, auxquels se réfèrent les *collapsonautes quantophréniques* : « *Il ne faut pas, pour autant, oublier les limites de la formalisation, car les hommes sont aussi guidés par l'intuition et la passion. Les modèles sont des inventions de l'esprit pour représenter un monde qui ne se laissera jamais enfermer dans la cage des équations. C'est heureux car, sans cette liberté, la volonté animée par le désir serait sans espoir ! Telle est la conviction qui nous anime : utiliser toutes les possibilités de la raison, tout en connaissant ses limites, mais aussi ses vertus.* » (Godet et Durance, 2011, p17).

Finalement, la croyance scientiste dont parle Max Weber, selon laquelle « *nous pourrions maîtriser toute chose par la prévision* », se réduit chez les *collapsonautes quantophrénistes* à la croyance en la toute puissance de la prévision scientifique. Par contre, la croyance selon laquelle « *nous pourrions maîtriser toute chose* » est substituée par son exact opposé.

Il est à noter que des prosélytes de la collapsologie appellent chacune et chacun à s'engager pour la survie de soi-même et de ses proches, mais aussi à préparer au mieux la traversée de la catastrophe globale et le monde de l'après catastrophe ; voir par exemple l'ouvrage *Une autre fin du monde est possible. Vivre l'effondrement (et pas seulement y survivre)* de Servigne Pablo, Raphaël Stevens et Gauthier Chappelle⁵⁹. Ils prennent ainsi le risque d'alimenter l'acceptation de l'effondrement et le fatalisme, de détourner des populations de la mobilisation qui vise à éviter l'effondrement, et finalement de contribuer à l'effondrement.

In fine, la collapsologie, qu'elle soit *quantophréniste* ou non, repose sur une croyance en une impuissance de l'humanité, plus précisément en son incapacité à se maîtriser et à maîtriser les déterminants en jeu dans les défis de notre temps. Il s'agit ici encore d'un déni de l'inconnu et de l'imprévisible.

59 Éditions du Seuil. Paris. Octobre 2018.

Conclusion : Une disjonction entre représentations et phénomènes représentés

Les chapitres 2 et 3 de notre première partie montrent l'existence d'une tension entre la bifurcation des deux systèmes hyper-complexes que sont le système-Terre et l'humanité, d'un côté, et, de l'autre, la quantophrénie.

La bifurcation du système Terre, qui mène ce dernier hors de la période du Quaternaire, et la bifurcation/métamorphose de l'humanité, enclenchée au XXe siècle (voir notre Annexe 1), sont toutes deux hautement chargées d'inédits et d'imprévisibles. Si bien qu'aujourd'hui le niveau d'imprévisibilité de l'avenir est particulièrement élevé. Par conséquent, le devenir de nombreux phénomènes échappe à toute tentative de représentation chiffrée, quantifiée. Or, de nos jours, la quantophrénie à laquelle n'échappent ni la science ni l'expertise ni le monde politique tend à limiter les représentations des phénomènes réels aux seules représentations quantifiées, à nourrir les processus de décisions politiques de ces seules représentations quantifiées, et donc à ne pas prendre en considération la part imprévisible du futur. Nous avons là une disjonction entre une vaste catégorie de phénomènes à venir ou amenés à évoluer dans l'avenir, d'un côté, et, de l'autre, les représentations dominantes et quantifiées qui en sont faites. Nous émettons la conjecture selon laquelle cette disjonction contribue aux difficultés que l'humanité rencontre dans la construction de réponses pertinentes face à certains problèmes globaux, et en particulier à celui du changement climatique.

C'est dans ce contexte que le changement climatique s'est développé en tant que question scientifique, puis en tant que question politique, et enfin en tant qu'objet d'une expertise de nature nouvelle réalisée par le GIEC.

Dans les deuxième et troisième parties de notre thèse, nous étudierons, notamment, la disjonction que nous venons d'exposer dans le cadre particulier du GIEC. Plus précisément, nous étudierons les scénarios climatiques pour le XXI^e siècle publiés dans les rapports de cette institution et regarderons si une telle disjonction s'y exprime, et nous observerons de quelle manière et avec quelle ampleur elle s'y exprime.

En outre, nous aborderons l'analyse du cadre institutionnel, scientifique et politique des travaux du GIEC, ainsi que l'analyse des apports ou conséquences politiques des publications par le GIEC de ses scénarios chiffrés.

DEUXIÈME PARTIE

L'institution

Chapitre 1 - **Présentation du GIEC, du mode de rédaction des rapports et du rôle des politiques**

Les sous-chapitres II.1.1, II.1.2 et II.1.3 ci-dessous présentent de façon synthétique des données qui, sauf précision contraire, sont issues de sites institutionnels, ceux du GIEC⁶⁰ et du gouvernement français⁶¹, d'un article de recherche, *Context and early origins of The Intergovernmental Panel on Climate Change* (Agrawala, 1998), d'un ouvrage de recherche, *GIEC La voix du climat* (De Pryck, 2022), d'une brochure officielle (ONERC, 2013) et enfin d'une présentation de Valérie Masson Delmotte datée du 31 janvier 2022⁶².

60 Site du GIEC : <https://www.ipcc.ch/>

61 Site du gouvernement français : <https://www.ecologie.gouv.fr/comprendre-giec>

62 Présentation de la contribution du GT1 au 6^e RE du GIEC, Valérie Masson-Delmotte, première séance du Grand Séminaire IPSL, 31 janvier 2022 : <https://www.youtube.com/watch?v=ZkwaYw8RMzk&t=4445s>.

II.1.1 - La mission

Le Groupe d'experts intergouvernemental sur les évolutions du climat (GIEC) a été créé en novembre 1988 par l'Organisation météorologique mondiale (OMM) et par le Programme des Nations Unies pour l'environnement (PNUE). Initialement appelé « Groupe intergouvernemental de l'évolution du climat », d'où l'acronyme GIEC, après quelques années d'existence le GIEC a été rebaptisé Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat, « *pour mieux refléter la signification de son appellation anglaise – Intergovernmental Panel on climate change (IPCC), panel désignant généralement un groupe d'individus dotés d'une certaine expertise* » ; (Kari De Pryck, 2014).

Les travaux du GIEC sont concentrés sur la publication de rapports. Ceux-ci sont de trois types. Tout d'abord il y a les Rapports d'évaluation (RE). Ce sont des synthèses de l'ensemble des connaissances scientifiques, techniques et socio-économiques relatives au changement climatique. Un rapport d'évaluation est publié tous les sept ou huit ans. Ensuite, il y a les rapports spéciaux, lesquels portent sur des questions particulières relatives au changement climatique. Ainsi, depuis octobre 2018, le GIEC a publié trois rapports spéciaux : *Réchauffement planétaire de 1,5°C*, en octobre 2018 ; *Changement climatique et terres émergées*, en août 2019 ; *L'océan et la cryosphère dans le contexte du changement climatique*, en septembre 2019. Enfin, il y a les rapports méthodologiques pour les inventaires nationaux des émissions de Gaz à effet de serre (GES).

Selon le document *Les principes directeurs du travail du GIEC*⁶³, adopté par ce dernier en 1998, « *le rôle du GIEC est d'évaluer, de manière exhaustive, objective, ouverte et transparente, les informations scientifiques, techniques et socio-économiques permettant de comprendre les fondements scientifiques du risque de changement climatique d'origine humaine, ses impacts potentiels et les options d'adaptation et d'atténuation. Les rapports du GIEC doivent être neutres par rapport aux politiques, bien qu'ils puissent avoir à traiter objectivement de facteurs scientifiques, techniques et socio-économiques pertinents pour l'application de politiques particulières.* ». (VOA⁶⁴).

63 <https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/09/ipcc-principles.pdf>

64 « *The role of the IPCC is to assess on a comprehensive, objective, open and transparent basis the scientific, technical and socio-economic information relevant to understanding the scientific basis of risk of human indu-*

Le GIEC n'est pas habilité à adresser des recommandations aux décideurs. Par contre, il lui est concrètement demandé d'exposer les conséquences de différents scénarios ou trajectoires techno-socio-économiques, qui reposent notamment sur des décisions politiques ; conséquences sur le climat et corrélativement sur la biosphère et sur les sociétés humaines. Au-delà, il s'agit de « chercher à générer un "consensus scientifique" sur le changement climatique et en particulier sur le rôle de l'Homme dans le changement climatique » (Hulme et Mahony, 2010, p.10) (VOA⁶⁵) et de publier des rapports qui aient un impact réel sur les décideurs politiques et économiques, ce que, en 1998, Shardul Agrawala exprimait en ces termes : « *Le changement climatique est un problème mondial, tant en termes de causes que de conséquences. Les incertitudes sont grandes et risquent de persister. Par ailleurs, les enjeux politiques et économiques de l'action et de l'inaction sont beaucoup plus importants que ceux d'autres problèmes transfrontaliers tels que les pluies acides et l'appauvrissement de la couche d'ozone. L'impact sur la politique publique des avis scientifiques sur le changement climatique dépend donc non seulement de ce qui est dit, mais aussi de qui avance ces conclusions et de la manière dont elles ont été obtenues. C'est la raison pour laquelle le Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC) a été créé en 1988.* » (VOA⁶⁶). (Agrawala, 1998). Citons maintenant V. Masson Delmotte, co-présidente du Groupe de travail 1 du GIEC de 2015 à 2023, selon laquelle les rapports du GIEC donnent un « état des connaissances » dont les gouvernements, « en se l'appropriant en font un socle commun sur lequel éventuellement s'appuient des négociations inter-

ced climate change, its potential impacts and options for adaptation and mitigation. IPCC reports should be neutral with respect to policy, although they may need to deal objectively with scientific, technical and socio-economic factors relevant to the application of particular policies ».

65 « seeking to generate a 'scientific consensus' around climate change and especially about the role of humans in climate change ».

66 « Climate change is a problem which is global both in terms of causes and consequences. The uncertainties are large and likely to persist. Meanwhile, the political and economic stakes of both action and inaction are much higher than those in other transboundary concerns such as acid rain and ozone depletion. The public policy impact of scientific opinions on climate change, therefore, not only depends upon what is being said, but also, who is advancing those conclusions and how they were arrived at. This was the rationale behind the setting up of the Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) in 1988. ».

nationales sur le climat »⁶⁷. Selon Stefan Aykut et Amy Dahan (2014, p.125), « *Le GIEC (...) a constamment œuvré pour renforcer conjointement sa légitimité scientifique et une crédibilité politique. Il ne s'agit pas tant de dire le « vrai de la science » aux gouvernements que de faire avancer une conviction partagée des risques environnementaux globaux* ».

Parmi les motivations qui sont au fondement de la création du GIEC, nous avons ici mis l'accent sur celle qui, nous le verrons, animera le GIEC au moins jusqu'à nos jours ; à savoir, « faire avancer » un consensus international à propos des connaissances relatives au changement climatique, un consensus qui ait un « impact sur les politiques publiques » et sur lequel puissent « s'appuyer les négociations internationales sur le climat ». Néanmoins, d'autres motivations, dont certaines plus circonscrites dans l'espace et dans le temps, ont pu s'exercer. Nous citerons à ce propos Mike Hulme et Martin Mahony (2010) : « *De nombreux éléments ont convergé à la fin des années 1980 pour créer les conditions d'où un organisme tel que le GIEC pourrait voir le jour* »(p.4) (VOA⁶⁸). Puis les deux auteurs citent une série de motivations dont une spécifique aux États-Unis : « *L'émergence, à la fin des années 1980, du GIEC en tant que moyen politiquement privilégié d'évaluation des connaissances sur le changement climatique doit beaucoup au malaise des Américains vis-à-vis du PNUE, d'une part, et, d'autre part, à leur désir de trouver un moyen d'équilibrer les positions des lobbies des combustibles fossiles et des écologistes aux États-Unis.* » (p.3), (VOA⁶⁹).

II.1.2 - Les acteurs

Le GIEC est pourvu d'une assemblée plénière, encore appelée assemblée générale, composée des 195 représentants des 195 États membres. Il est en outre pourvu d'un bureau composé de scientifiques, aujourd'hui au nombre de 34. Ces derniers sont élus par l'assemblée plénière,

67 Présentation de la contribution du GT1 au 6^e RE du GIEC, Valérie Masson-Delmotte, Op. Cit., ± 10'30''.

68 « *Many elements converged in the late 1980s to create a fruitful space in which a body such as the IPCC could emerge.* ».

69 « *The emergence in the late 1980s of the IPCC as the politically favoured means of climate change knowledge assessment owed much to American unease about UNEP and to their desire to find a means of balancing the advocacy positions of the fossil fuel and environmentalist lobbies in the USA.* »

pour un cycle complet de sept à huit ans durant lequel est rédigé un Rapport d'évaluation. Ils sont donc élus par des représentants du monde politique. Notons, toutefois, que le temps long d'un cycle est un facteur d'indépendance du bureau du GIEC. Le bureau en charge du 6^e RE a été élu lors de la 42^e assemblée plénière, réunie du 5 au 8 octobre 2015 à Dubrovnik (Croatie) ; son mandat devrait s'achever en 2023.

Le GIEC organise son activité autour de trois Groupes de travail (GT) :

- Le Groupe de travail 1 (GT1) sur les bases physiques du système et du changement climatiques. Il présente un état des connaissances basé sur des productions scientifiques en physique, chimie, biologie, géologie, paléontologie..., ainsi qu'en climatologie et modélisation climatique.
- Le Groupe de travail 2 (GT2) sur les conséquences du changement climatique et l'adaptation à celui-ci.
- Le Groupe de travail 3 (GT3) sur l'atténuation du changement climatique.

S'y ajoute l'Équipe spéciale pour les inventaires nationaux de Gaz à effet de serre (GES).

Chaque GT dispose de son propre bureau, composé de deux Co-Présidents et de Vice-Présidents. Lors du cycle actuel de rédaction, 6^e RE (2015-2023), ces derniers sont au nombre de sept pour les GT1 et GT3, et de huit pour le GT2. La française Valérie Masson-Delmotte est co-présidente⁷⁰ du GT1 (6^e RE). Auparavant le Français Jean Jouzel était l'un des vice-Présidents⁷¹ de ce même GT.

Le bureau du GIEC, de l'ensemble du GIEC, est composé du Président du GIEC, des trois vice-Présidents, de la réunion des bureaux des trois GT et des deux co-Présidents de l'Équipe spéciale.

Par ailleurs, il y a les auteurs des rapports, les relecteurs (spécialistes de disciplines scientifiques) et les éditeurs-réviseurs. Pour la rédaction d'un Rapport d'évaluation du GIEC, chaque bureau d'un GT nomme les auteurs coordinateurs, les auteurs principaux et les éditeurs-réviseurs de chaque chapitre de sa contribution au rapport ; puis les auteurs coordinateur et les auteurs principaux nomment des auteurs contributeurs. Quant aux relecteurs, ils ne sont pas nom-

70 Voir p.I du 6^e RE https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg1/downloads/report/IPCC_AR6_WGI_FrontMatter.pdf

71 <https://archive.ipcc.ch/organization/subform.bureauforth.htm>

més par le bureau, ni directement ni indirectement. L'ensemble de ce point sera précisé dans le sous-chapitre qui suit.

Enfin, il y a les organisations observatrices : agences de l'ONU, Organisations intergouvernementales (IOG) et Organisations non gouvernementales (ONG). Le statut d'organisation observatrice est octroyé par l'Assemblée plénière. Il permet d'être représenté lors des assemblées plénières et « *occasionnellement de prendre la parole en séance plénière, lorsque tous les représentants des gouvernements sont intervenus.* » (De Pryck, 2022, p.116) ; aussi, et peut-être surtout, hors de ces séances il y a les échanges informels.

II.1.3 - Les rapports

Les Rapports d'évaluation du GIEC sont composés de quatre parties distinctes : les contributions des trois Groupes de travail, suivies d'un Rapport de synthèse.

La contribution d'un GT est composée d'un Rapport intégral, d'un Rapport technique (RT) et d'un Résumé à l'intention des décideurs (RID). Le Rapport intégral de la contribution du GT1 au 5^e RE, publié en 2013, est composé de 14 chapitres.

Le Rapport de synthèse est composé d'un Rapport intégral et de son propre RID.

Depuis le 4^e RE, la rédaction de la contribution d'un GT à un RE se déroule en dix étapes.

1. L'assemblée plénière du GIEC, c'est-à-dire les représentants présents des 195 États membres, fixe le cadre général du rapport, en détermine les grandes lignes et en définit l'architecture, les titres des chapitres et les thématiques abordées dans chaque chapitre.

2. Les gouvernements nationaux, l'OMM et le PNUE proposent pour chaque GT des experts scientifiques comme auteurs coordinateurs ou principaux de la contribution du GT. Pour l'ensemble du 5^e RE, environ 3 000 experts scientifiques ont été proposés ; parmi lesquels 831 ont ensuite été sélectionnés.

3. Chaque bureau d'un GT sélectionne les auteurs coordinateurs ou principaux de sa contribution. En vue de la rédaction du 6^e RE, un millier d'auteurs ont été proposés pour la contribution du GT1, 234 ont été sélectionnés et chacun d'eux a été nommé auteur coordinateur ou auteur principal d'un chapitre du rapport.

4. Dans chaque groupe de travail, les auteurs rédigent une première version de la contribution au RE. Plus exactement, pour un chapitre donné, les auteurs coordinateurs et auteurs principaux de ce chapitre nomment des auteurs contributeurs, d'où un élargissement des compétences mobilisées et un enrichissement des apports ; ensuite le travail de rédaction commence.

A titre d'exemple, pour la contribution du GT1 au 5^e RE, le nombre d'auteurs⁷² par chapitre allait d'un minimum de 22 (chapitre 1 ; 2 auteurs coordinateurs, 5 auteurs principaux, 15 auteurs contributeurs) à un maximum de 102 (chapitre 6 ; 2 auteurs coordinateurs, 13 auteurs principaux, 87 auteurs contributeurs).

La responsabilité du contenu d'un chapitre et les éventuels arbitrages incombent à ses auteurs coordinateurs et auteurs principaux ; à cette étape, chaque chapitre est collectivement validé de façon provisoire par ces derniers.

5. La première version du rapport est examinée par les spécialistes volontaires de chaque discipline, lesquels disposent de 8 semaines pour transmettre leurs commentaires. Il est à noter que ces spécialistes ne sont pas nommés par les gouvernements. Chaque chercheur des disciplines concernées peut transmettre des commentaires.

6. Sur la base des commentaires reçus, chapitre par chapitre les auteurs coordinateurs et les auteurs principaux préparent une deuxième version du texte.

72 Certains auteurs sont présents sur plusieurs chapitres du même RE. Ainsi, pour le 5^e RE, Valérie Masson-Delmotte était auteure coordinatrice du chapitre 5 et auteure contributrice du chapitre 10.

7. Cette deuxième version est à son tour examinée par les spécialistes de chaque discipline (136706 commentaires cumulés sur les 5^e et 7^e étapes ont été reçus de scientifiques du monde entier pour le 5^e RE). Cette deuxième version est de plus examinée par les gouvernements (ce qui n'était pas le cas de la première version). Ici encore, le délai pour transmettre des commentaires est de 8 semaines.

8. Sur la base des commentaires venant de scientifiques et de gouvernements, les auteurs établissent la version définitive du rapport⁷³ ainsi qu'un projet de Résumé à l'intention des décideurs (RID).

9. Les gouvernements examinent le RID. Pour ce faire ils disposent de 8 semaines.

10. L'assemblée plénière des représentants des gouvernements « accepte » le rapport intégral, ce qui signifie que ce dernier est validé chapitre par chapitre.

Elle amende et « approuve » le RID, ce qui signifie que ce texte est passé en revue phrase par phrase, figure par figure, tableau par tableau, sous le contrôle de scientifiques auteurs coordinateurs et auteurs principaux du rapport. Les représentants des gouvernements peuvent demander des modifications, mais uniquement en se basant sur les données scientifiques du rapport intégral. Réciproquement, des passages du rapport intégral peuvent être modifiés afin d'assurer la concordance avec le RID (De Pryck, 2022, p.89). Sur tel ou tel élément, un désaccord exprimé

73 Pour chaque chapitre d'un rapport, de deux à quatre éditeurs-réviseurs sont nommés. Selon le site du GIEC (https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/04/FS_review_process_fr.pdf), leur mission est définie en ces termes : « s'assurer que toutes les observations importantes reçues au cours du processus d'examen ont bien été prises en compte par les équipes d'auteurs et veiller à ce que les rapports reflètent adéquatement les réelles différences de point de vue constatées dans la littérature scientifique ». Il faut savoir que les chapitres du GT1 du 5^e RE dépassent le plus souvent 100 pages, couvrent de vastes domaines scientifiques et, bien souvent, ont été l'objet de plus de 5000 commentaires ; c'est dire l'immensité de la tâche qui revenait à chaque éditeur-réviseur.

par un ou plusieurs pays peut être notifié⁷⁴. Enfin, le texte est validé par consensus, sans vote formel de l'ensemble des représentants présents à la plénière. « *En l'absence d'objections, le dernier coup de marteau du président résonne dans la salle. Le résumé à l'intention des décideurs est approuvé* » (De Pryck, 2022, p.134).

Quant au Rapport de synthèse, sa version intégrale est « adoptée » par l'Assemblée plénière, c'est-à-dire validée section par section ; son RID est « approuvé », c'est-à-dire validé phrase par phrase, tableau par tableau, figure par figure, de façon identique à l'« approbation » des RID des contributions des trois GT.

A propos du mode de finalisation et d'adoption des RID, selon Valérie Masson-Delmotte : « *C'est un exercice extrêmement important pour s'assurer que ce Résumé à l'intention des décideurs :*

1. *soit rigoureusement traçable au rapport complet ;*
2. *soit exprimé de manière claire ;*
3. *reflète de manière équilibrée les éléments de conclusion principale qui sont perçus comme pertinents de la part des différents pays du monde. »*⁷⁵

La philosophe des sciences Anouk Barberousse analyse cette même et dernière étape de la rédaction des RID en ces termes : « *Approuvé par les délégations de tous les États, le résumé pour les décideurs ne peut être contesté par aucun gouvernement. Il exprime un consensus hybride, mi-politique, mi-scientifique, puisque les experts scientifiques du GIEC ont un droit de*

⁷⁴ Ainsi une note du *Document de synthèse des informations scientifiques et techniques relatives à l'interprétation de l'article 2 de la CCNUCC* (1ère partie), approuvée en 1995 mot à mot par l'assemblée plénière, précise « *Le Koweït se déclara en désaccord avec le fait de citer uniquement le paragraphe 3.3 de l'article 3 de la CCNUCC et non l'article dans son intégralité* ». Le dit paragraphe 3.3 est centré sur les mesures de précautions, alors que le reste de l'article est centré sur la différenciation des situations des différents pays.

⁷⁵ Présentation de la contribution du GT1 au 6^e RE du GIEC, Valérie Masson-Delmotte, première séance du Grand Séminaire IPSL, 31 janvier 2022 : <https://www.youtube.com/watch?v=ZkwaYw8RMzk&t=4445s>.

regard sur sa formulation : le résumé peut délivrer une formulation atténuée ou sélective de l'état de la connaissance établi dans les rapports complets, mais il ne peut ni la trahir ni l'ignorer. » (Barberousse A., 2015). Nous pouvons noter une tension entre les passages « *une formulation atténuée ou sélective de l'état de la connaissance* » et « *ni la trahir ni l'ignorer* » ; tension inhérente à la construction d'un consensus hybride, mi-politique, mi-scientifique, perçu comme (selon les termes de V. Masson-Delmotte) « *pertinent de la part des différents pays du monde* ». Au sujet de ce consensus exprimé par les RID, voici un propos de Jim Skea, vice-président du GT3 du cycle du 5^e RE, puis coprésident de ce même groupe pour le cycle du 6^e RE, propos tenu lors d'un interview par *Carbon brief*⁷⁶ et reproduit par Kari De Pryck : « *C'est tout à fait exact et il est tout à fait clair que certaines choses sont acceptables dans les chapitres parce qu'ils sont, peut-être, si je peux le dire ainsi, moins lus que le résumé, qui est également l'un des fondamentaux des négociations. Les pays ne vont pas accepter dans les résumés des points qui pourraient compromettre une position de négociation future* ». (De Pryck, 2022, p.144).

Pour finir, un propos de Jean Jouzel : « *Membre du GIEC, il m'est interdit d'en commenter les résultats avant que le rapport ne soit avalisé par les gouvernements et que celui-ci ne soit dans sa forme définitive.* »⁷⁷

II.1.4 – La place du politique

II.1.4.1 – Approche générale

Les rapports du GIEC font « *autorité* » (H. Guillemot, 2014, p.343). Ils constituent une référence pour la plupart des responsables politiques et « *bénéficient d'une large médiatisation internationale* » (S. Aykut, 2015, p.103). Selon Mike Hulme et Martin Mahony (2010, p.13)

76 <https://www.carbonbrief.org/carbon-brief-interview-prof-jim-skea/>

77 Interview de Jean Jouzel, membre du GIEC, novembre 2000. Résumé par Nicolas Chevassus-au-Louis, Journaliste scientifique. <https://planet-terre.ens-lyon.fr/ressource/la-haye.xml> .

« Une chose sur laquelle presque tous les commentateurs et les critiques s'accordent à propos du GIEC est qu'il a eu une influence considérable sur la connaissance du changement climatique, sur le discours public concernant le changement climatique et sur l'élaboration de la politique climatique » (VOA⁷⁸). Finalement, ils contribuent à la représentation du changement climatique par les populations humaines et exercent une influence sur les stratégies des décideurs voire en constituent un fondement. S. Aykut (2015, p.103) décrit cette place occupée par le GIEC en ces termes : « Le cadrage dominant du problème climatique dans les négociations internationales et dans l'espace public confère un rôle primordial aux sciences et à l'expertise. En témoigne la création du GIEC, instance d'expertise singulière qui publie tous les quatre à cinq ans de grands rapports d'évaluation des connaissances scientifiques. Intervenant généralement à des dates-clés des négociations internationales, ces publications sont directement destinées au processus politique et visent à en constituer le fondement scientifique. ».

Revenons maintenant sur le « consensus hybride, mi-politique, mi-scientifique » qui, selon A. Barberousse, est exprimé dans les RID (voir le précédent sous-chapitre). L'importance que les gouvernements accordent aux RID est à relier au fait que ce qui, venant du GIEC, circule dans les espaces médiatiques et politiques est issu, pour l'essentiel, de ces mêmes RID (sinon des Résumés techniques). Mais qu'en est-il du regard et des comportements des scientifiques du GIEC à l'égard des RID ? Selon S. Aykut et A. Dahan (2014, p.76), si un scientifique co-auteur d'un chapitre d'un rapport fonctionne, dans la grande majorité des cas, comme un « scientifique expert », c'est-à-dire « compétent et familier d'un domaine qu'il a exploré » dont il « revoit des résultats et en fait la synthèse », « en revanche, ceux qui doivent écrire le résumé pour décideurs et le négociateur mot à mot sont clairement » des « experts scientifiques » « appelés pour produire, au nom de leurs connaissances scientifiques » des avis fondés à destination des décideurs. Expert scientifique qui, selon Aykut et Dahan, « se comportent toujours, consciemment ou non, comme les avocats d'une certaine cause, et cela est d'autant plus vrai qu'ils considèrent comme cruciaux les enjeux de la décision » que les responsables politiques ont à prendre.

78 « One thing that nearly all commentators and critics agree on about the IPCC is that it has had a significant influence on climate change knowledge, on public discourse about climate change and on climate policy development. ».

Le GIEC a finalement une nature hybride, mi-politique, mi scientifique ; ou plus exactement mi-politique, mi-expertise scientifique, cela conformément au nom de cette institution. En effet, le GIEC est l'acronyme du Groupe d'experts intergouvernemental sur les évolutions du climat. Nous y trouvons une référence aux gouvernements. Nous y trouvons aussi une référence aux experts. Par contre, nous n'y trouvons aucune référence aux scientifiques. Dans les faits, cela renvoie au fait que l'activité des scientifiques au sein du GIEC n'est pas de produire de la science, mais de produire une expertise fondée sur la science. Le terme intergouvernemental, quant à lui, renvoie au fait que le GIEC est une organisation des Nations Unies, c'est-à-dire une organisation dont la politique et les décisions importantes relèvent de l'assemblée des États membres. Ainsi, le document *Les principes directeur du travail du GIEC*⁷⁹, adopté par l'assemblée générale du GIEC en 1998 précise :

- « *Le contrôle est une partie essentielle du processus du GIEC. Puisque le GIEC est un organe intergouvernemental, le contrôle des documents du GIEC doit impliquer à la fois un examen par les pairs, c'est-à-dire par des experts, et un examen par les gouvernements.* » (VOA⁸⁰) ;

- « *Les principales décisions du GIEC seront prises par l'Assemblée plénière.* » (VOA⁸¹).

Comme montré par les travaux en sociologie des sciences, en sciences politiques et en STS (Agrawala, 1998 ; Dahan et Guillemot, 2006 ; Aykut et Dahan, 2014 ; Dahan et Guillemot, 2015 ; De Pryck, 2022), le GIEC, lieu d'interactions entre le monde scientifique et le monde politique, est aussi un lieu de confrontation entre des intérêts communs et des intérêts nationaux divergents. Amy Dahan et Hélène Guillemot (2015, p.8) illustrent ce constat de quelques exemples : « *La ratification des « résumés pour décideurs », qui doivent être approuvés ligne par ligne par les représentants des gouvernements, est un processus hautement politique où s'expriment des intérêts nationaux divergents : les petites îles usent de la rhétorique du risque, les pays pétroliers soulignent les incertitudes et le rôle des autres gaz que le CO₂, les pays en développement mettent en avant le poids des émissions du passé, etc.* ».

79 <https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/09/ipcc-principles.pdf>

80 « *Review is an essential part of the IPCC process. Since the IPCC is an intergovernmental body, review of IPCC documents should involve both peer review by experts and review by governments.* ».

81 « *Major decisions of the IPCC will be taken by the Panel in plenary meetings.* ».

Pour résumer cette section, nous notons que le GIEC est un lieu hybride, tout à la fois politique et d'expertise scientifique, au service de l'émergence et du développement d'une dynamique internationale, afin de faire face à un problème global qui appelle une mobilisation de l'ensemble des nations. Pour finir, une citation politique, datée de 2018, de Frédérique Vidal, alors Ministre française de l'enseignement supérieur, de la recherche et de l'innovation : "*L'histoire du GIEC, c'est en effet celle d'une interface fertile entre la science et la politique qui n'a cessé de gagner en pertinence et en efficacité pour installer peu à peu le savoir à sa juste place : celle d'éclairer universel de l'initiative collective. Je tiens à en féliciter le GIEC et me réjouis que le soutien de nombreux États, et particulièrement de la France*⁸², permette au GIEC de poursuivre ses travaux si importants pour la prise de décision au sein du cycle des COP"⁸³. Nous notons que, dans ce propos de la ministre, il conviendrait d'interroger la notion de « savoir ». Quel est donc ce savoir « éclairer universel de l'initiative public » ? Nous avons déjà entraperçu qu'il s'agirait bien plutôt d'un savoir expert outil de la décision.

II.1.4.2 – CCNUCC : une demande politique adressée au GIEC

II.1.4.2.1 – Vers le lancement de la CCNUCC

En juin 1992, un mois après l'adoption par l'ONU du texte fondateur de la CCNUCC, le GIEC publia un document de synthèse de ses évaluations faites sur la période 1990-1992. Dans sa préface générale, signée de G.O.P. Obasi, Secrétaire général de l'OMM et de M.K. Tolba, Directeur exécutif du PNUE, nous pouvons lire : « *En août 1990, le GIEC remettait son premier Rapport d'évaluation (...). Convaincu qu'il ne fallait pas en rester là et que l'on aurait besoin d'autres éléments d'information sur le climat et son évolution pour la négociation, déjà engagée, de la future convention-cadre sur les changements climatiques et pour la Conférence des*

82 En 2018 la France a fourni plus 50 % des recettes du GIEC, notamment afin de palier à l'absence de financement par les États-Unis en 2017 puis à la quasi absence en 2018. Voir :

<https://apps.ipcc.ch/eventmanager/documents/75/260720220715-Doc.%20%20-%20%20IPCC%20Programme%20and%20Budget.pdf>

83 <https://www.enseignementsup-recherche.gouv.fr/fr/trentieme-anniversaire-du-giec-trois-decennies-de-travaux-sur-le-climat-de-nouveaux-defis-relever-46944>

Nations Unies sur l'environnement et le développement (Rio de Janeiro, juin 1992), le GIEC, obéissant d'ailleurs aux instructions des organes directeurs de l'OMM et du PNUE, a demandé en mars 1991 à ses trois groupes de travail d'actualiser leurs rapports de 1990. »⁸⁴. Plus loin dans ce document, nous pouvons lire à propos du 1^{er} RE, publié en 1990 : « La présentation des diverses questions, options et stratégies dans le Rapport d'évaluation du GIEC est destinée à aider les décideurs et les futurs négociateurs dans leurs tâches respectives. »⁸⁵.

Trois ans plus tard, en 1995, dans le texte sur lequel nous reviendrons dans la section suivante, le GIEC précisait que : « *Son Premier Rapport d'évaluation (...) a servi de base scientifique et technique à la Convention-cadre des Nations Unies sur les changements climatiques (CCNUCC).* »⁸⁶

II.1.4.2.2 - L'application de l'objet de la CCNUCC

Nous rappelons que l'article 2 du texte fondateur de la CCNUCC en fixe l'objectif : « *stabiliser les concentrations de gaz à effet de serre dans l'atmosphère à un niveau qui empêche toute perturbation anthropique dangereuse du système climatique.* ».

Un mois après le Sommet de la Terre, en juillet 1992 le Conseil exécutif de l'OMM prit une décision qui s'est traduite, en décembre 1995, par une publication du GIEC intitulée *Document de synthèse des informations scientifiques et techniques relatives à l'interprétation de l'article 2 de la Convention cadre des Nations Unies sur les changements climatiques*⁸⁷. Dans ce texte, le GIEC s'engage à répondre aux besoins en expertise scientifique de l'objectif de la Convention Cadre des Nations Unies.

84 https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/05/ipcc_90_92_assessments_far_full_report_fr.pdf . Page VII.

85 P.55.

86 Section 1.3, page 3 du *Document de synthèse des informations scientifiques et techniques relatives à l'interprétation de l'article 2 de la Convention cadre des Nations Unies sur les changements climatiques*
<https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/06/2nd-assessment-fr-1.pdf>

87 <https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/06/2nd-assessment-fr-1.pdf>

En voici le paragraphe introductif : « A la suite d'une résolution du Conseil exécutif de l'Organisation météorologique mondiale (juillet 1992), le Groupe intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC) a décidé d'inclure dans son programme de travail l'étude de divers aspects de l'article 2 de la Convention-cadre des Nations Unies sur les changements climatiques. En octobre 1994, (...) le GIEC a organisé un atelier à ce sujet à Fortaleza, au Brésil. Le président du GIEC a réuni sous sa présidence une équipe d'auteurs principaux chargée de rédiger le Document de synthèse. L'équipe a rédigé une version préliminaire de ce document, qui a été soumise à l'appréciation des experts et des gouvernements. La version définitive a été approuvée mot à mot par le GIEC lors de sa onzième session (Rome, 11-15 décembre 1995) »⁸⁸

Puis loin, deux extraits de ce document, approuvé mot à mot par les représentants des gouvernements, fixa l'une des missions centrales du GIEC :

- « L'objectif ultime de la Convention-cadre sur les changements climatiques, stipulé dans l'article 2 de la CCNUCC, est de 'stabiliser [...] les concentrations de gaz à effet de serre dans l'atmosphère à un niveau qui empêche toute perturbation anthropique dangereuse du système climatique. Il conviendra d'atteindre ce niveau dans un délai convenable pour que les écosystèmes puissent s'adapter naturellement aux changements climatiques, que la production alimentaire ne soit pas menacée et que le développement économique puisse se poursuivre d'une manière durable.' »⁸⁹.

- « L'article 2 confronte le décideur avec les problèmes de déterminer quelles concentrations de gaz à effet de serre seraient à considérer comme source de "perturbation anthropique dangereuse du système climatique" et de planifier un avenir permettant un développement économique durable. Le présent Document de synthèse, fondé sur les rapports présentés en 1994 et 1995 par les groupes de travail du GIEC (i.e. fondé sur le 2^e RE), a pour objet d'offrir des informations d'ordre scientifique, technique et socio-économique susceptibles de contribuer à la résolution de ce problème. »⁹⁰.

88 Section 1.1, page 3.

89 Section 1.4, page 3.

90 Section 1.5, page 3.

Nous pouvons de suite noter que dès le 2^e RE (1995), et au moins jusqu'au 5^e RE (2013-2014), le GIEC appliqua l'article 2 de la CCNUCC dans le sens où, contrairement aux 1^{er} RE, les scénarios climatiques finirent tous par une stabilisation des concentrations de GES.

Par la suite, en 1998 l'Assemblée générale du GIEC adopta un document⁹¹ définissant ou plutôt rappelant les principes directeurs du travail de la structure. En voici les termes introductifs : « *Le Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat concentrera ses activités sur les tâches qui lui ont été confiées par les résolutions et décisions du Conseil d'administration du PNUE et du Conseil exécutif de l'OMM, ainsi que sur des actions de soutien de l'activité de la Convention-cadre des Nations Unies sur les changements climatiques.* » (VOA⁹²).

II.1.4.3 – Planification

Du document adopté par le GIEC en 1995, qui précise les liens avec la CCNUCC, nous avons reproduit deux extraits dans la section ci-dessus. Le second d'entre eux amène quelques remarques.

Cet extrait contient la présentation de deux « problèmes ». Tout d'abord, il y a l'affirmation selon laquelle il serait possible de « déterminer quelles concentrations de gaz à effet de serre seraient à considérer comme source d'une possible "*perturbation anthropique dangereuse du système climatique*" ». Il s'avère qu'une telle détermination est impossible à obtenir sur la base des connaissances scientifiques (voir chapitre I.2 et partie III). D'ailleurs, le document du GIEC ne dit pas le contraire, puisqu'il y est précisé que la contribution du GIEC se limite à « offrir des informations (...) susceptibles de contribuer à la résolution de ce problème », la résolution en soi revenant aux « décideurs » politiques.

91 <https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/09/ipcc-principles.pdf>

92 « *The Intergovernmental Panel on Climate Change shall concentrate its activities on the tasks allotted to it by the relevant WMO Executive Council and UNEP Governing Council resolutions and decisions as well as on actions in support of the UN Framework Convention on Climate Change process.* ».

Ensuite, il y a l'objectif « de planifier un avenir permettant un développement économique durable ». Il est notable que la formulation du premier problème est articulée autour de l'expression « seraient à considérer comme », alors que la formulation du second problème l'est autour du mot « permettant ».

Il est aussi à noter qu'en toute fin de cet extrait, les deux « problèmes » ne font plus qu'un, si bien que, selon ce document, la planification dont il est question semble devoir reposer sur la détermination d'un seuil à partir duquel « les concentrations de gaz à effet de serre seraient à considérer comme source d'une possible "perturbation anthropique dangereuse du système climatique" ». Ainsi, la stratégie d'atténuation du changement climatique consisterait en une planification permettant un avenir durable qui, concrètement, reposerait sur le non dépassement d'un plafond de concentration de GES déterminé politiquement.

Une difficulté scientifique affaiblit la stratégie exposée. Cependant, dans le document du GIEC rien n'est dit à son sujet, ni explicitement ni implicitement. Mettons nous dans l'hypothèse où le plafond de concentration dont il est question soit fixé. Définir une planification de l'avenir permettant de ne pas dépasser ce plafond supposerait que la connaissance scientifique soit suffisante pour déterminer des courbes d'émissions de GES qui permettraient à la concentration de GES dans l'atmosphère de rester sous ce plafond. En creux, cela suppose que cette connaissance scientifique est disponible ou le sera dans un avenir assez proche. Or des inconnues scientifiques et un caractère d'imprévisibilité se présentent au sujet des rétroactions climatiques et plus largement au sujet du système Terre, et font aujourd'hui obstacle à l'acquisition d'une telle connaissance. Nous avons abordé ce point dans le chapitre I.2. Finalement, cet extrait du document de 1995 du GIEC est habité par la quantophrénie, et par une croyance débridée en la prévision et en la maîtrise par la science et la technique.

II.1.4.4 – Un appel du GIEC à prendre en considération la complexité

Le GIEC n'est pas exempt de tensions. Ainsi, un passage de ce document de 1995 alerte sur la complexité du système climatique et sur les incertitudes : « *L'évolution du climat présente pour les décideurs un redoutable ensemble de difficultés : des incertitudes considérables inhérentes*

à la complexité du système, le risque de coûts ou de dommages irréversibles, une planification à très longue échéance, un décalage important entre les émissions et leurs impacts, de vastes différences régionales dans les causes et les effets, un problème irréductiblement global et de nombreux gaz à effet de serre et aérosols à prendre en compte. Le fait que la protection efficace du système climatique exige une collaboration à l'échelle mondiale complique encore la situation, étant donné les grandes différences existant en matière de revenus, de souplesse d'évolution et de perspectives d'avenir, ce qui pose des problèmes d'efficacité et d'équité nationale, internationale et entre générations. L'équité est un facteur important de légitimation des décisions et d'incitation à la coopération. ».

Chapitre 2 - Les scénarios climatiques

Les Rapports d'évaluation du GIEC contiennent des scénarios qui mènent jusqu'à la fin du XXI^e siècle. Chaque scénario présente une évolution des émissions de GES tout au long de ce siècle, suivie tout d'abord d'évolutions qui en découlent en termes de concentration de ces GES, de température terrestre moyenne, de climat global et de climats régionaux, puis de conséquences sur la biosphère, l'économie, l'alimentation et plus largement sur les sociétés humaines.

Il ne faudrait toutefois pas en déduire que, sur la base de ces scénarios, les responsables politiques pourraient, si certaines conditions politiques et géopolitiques étaient vérifiées, fixer un seuil de concentration à ne pas dépasser, et que, pour respecter cet objectif, il suffirait de planifier des émissions pour le XXI^e siècle. Pourtant, selon le mathématicien et philosophe des sciences Nicolas Bouleau (2014, p.34), « *malgré les conflits d'intérêt et les débats entre les modélisateurs, les anthropologues des sciences, les experts officiels ou privés, les économistes et les politiques, une part significative de la communauté scientifique a jugé ses travaux de modélisation suffisamment conclusifs pour que les spécialistes internationaux du GIEC présentent des scénarios prévisionnels* ». Nous pourrions donc penser que la science aurait réussi le tour de force de prédire l'avenir climatique du XXI^e siècle en fonction des émissions de GES. À la suite du chapitre I.2, dans le présent chapitre II.2, qui sera complété par le chapitre III.2, nous allons étudier certains aspects des modèles et des scénarios climatiques, en particulier le traitement réservé à l'imprévisible, cela en vue, notamment, d'apporter une contradiction étayée à ce qui serait, selon N. Bouleau, le produit du jugement d'une « part significative de la communauté scientifique », mais qui renvoie à la croyance, pointée par Max Weber, selon laquelle « nous pourrions maîtriser toute chose par la prévision ».

Note. Au long de ce chapitre, le plus souvent nous restreindrons le propos à la contribution du GT1 au 5^e RE, publié en 2013.

II.2.1 - Les différents profils

II.2.1.1 – Approche générale

Les données présentées dans cette section sont issues du 5^e RE⁹³

La contribution du Groupe de travail 1 au 5^e RE présente, entre autres choses, quatre profils représentatifs d'évolution de concentration des GES - RCP2.6 ; RCP4.5 ; RCP6.0 ; RCP8.5 – ici rangés dans l'ordre croissant d'ampleur du changement climatique. Ces profils ont été dénommés en fonction de leurs objectifs distincts concernant l'augmentation du forçage radiatif total en l'année 2100 par rapport à l'année 1750 (respectivement environ 2,6 Wm⁻², 4,5 Wm⁻², 6,0 Wm⁻² et 8,5 Wm⁻²). Le sigle RCP vient de l'anglais : Representative Concentration Pathways. Chaque scénario climatique pour le XXI^e siècle de ce 5^e RE est un scénario techno-socio-économique qui vérifie l'un de ces profils. Le GT1 associe à chacun de ces profils une projection climatique pour le XXI^e siècle, laquelle comprend, entre autres choses, l'évolution d'une fourchette d'élévation moyenne du niveau de la mer et l'évolution d'une fourchette d'élévation de la température moyenne à la surface de la terre.

Selon ces projections, entre la période de référence 1986-2005 et la période 2086-2095, la fourchette d'élévation de la température moyenne à la surface de la Terre, évaluée en degré Celsius, serait :

RCP2.6 : [0,2 ; 1,8]

RCP4.5 : [1 ; 2,6]

RCP6.0 : [1,5 ; 3,2]

RCP8.5 : [2,6 ; 4,8]

Il faut ajouter 0,61°C⁹⁴ pour obtenir l'évolution par rapport à la période 1850-1900.

93 - Page 1444 du rapport complet du GT1, Annexe II. Table AII.7.5.

- Page 29 (encadré RID.1 du RID) et page 79 (partie RT.5 du Résumé technique) du documents en français présentant les Résumés et la Foire aux questions de la contribution du GT1 au 5^eRE.

94 Plus exactement, il faut tenir compte de l'évolution de la température dont « la variation observée entre la moyenne de la période 1850-1900 et celle de la période de référence du RE5 (1986-2005) est de 0,61 [0,55 à 0,67] °C. ». 5^e RE, RID du GT1, p.19.

Chaque profil RCP correspond donc à un ensemble de scénarios techno-socio-économiques. Notre thèse, dans la suite de cette deuxième partie et en sa troisième partie, ne portera pas sur ces derniers, mais sera centrée sur la traduction, telle que présentée par la contribution du GT1 du 5^e RE, de chaque profil RCP en une projection climatique pour le XXI^e siècle.

Par abus de langage, la projection climatique associée à un profil RCPX sera parfois appelée scénario climatique RCPX ou, plus brièvement, scénario RCPX. Ainsi le scénario RCP2,6 sera la projection climatique sur le XXI^e siècle associée au profil de concentration de GES RCP2,6. Lorsque nous parlerons d'un scénario d'activités humaines en amont des profils RCP, nous préciserons qu'il s'agit d'un scénario techno-socio-économique.

II.2.1.2 – Des profils nouveaux qui réduisent les incertitudes

Entre le 4^e RE et le 5^e RE, le GIEC a apporté une modification majeure dans la structure de ses scénarios. Dans le 4^e RE, les scénarios présentés étaient des scénarios d'émissions anthropiques de GES, scénarios SRES (acronyme anglais de Special Report on Emissions Scenarios⁹⁵). Dans le 5^e RE, nous avons vu qu'il s'agissait de scénarios de concentration de GES, scénarios RCP. Les différents profils du 4^e RE étaient donc des profils d'émissions anthropiques de GES. A chaque profil d'émissions anthropiques, le GIEC associait une projection climatique pour le XXI^e siècle (température, élévation du niveau des mers, etc.).

La distinction entre SRES et RCP n'est pas que technique ni anecdotique. En effet, les émissions de GES ne sont pas toutes anthropiques. A côtés des sources de GES dues à l'activité humaine (utilisation d'énergies fossiles, élevage de ruminants (émetteurs de méthane), etc.), existent des sources naturelles (zones humides naturelles (émettrices de méthane), fonte du pergélisol, etc.). Si bien que la concentration de GES ne dépend pas uniquement des émissions anthropiques de GES, mais aussi de l'évolution de l'activité des sources naturelles de GES. Enfin, il faut aussi prendre en considération l'évolution des puits naturels de GES (océans, forêts, etc.). Toutefois, si l'activité des sources et des puits naturels était constante (ne se modifiait pas avec le temps), alors la connaissance des seules émissions et captations

95 Le Special Report on Emissions Scenario (SRES) est un Rapport spécial du GIEC, publié en l'an 2000, où sont introduits les scénarios du même nom. Ces scénarios vont apparaître dans le 3^e RE (2001) à côté d'une autre sorte de scénarios d'émissions. Ils seront les seuls scénarios présents dans le 4^e RE.

anthropiques de GES serait suffisante pour déterminer la concentration ; et ainsi le choix de passer de scénarios d'émissions à des scénarios de concentration serait mineure. Mais il n'en est rien.

L'activité des sources et puits naturels de GES n'est pas constante et ne le sera pas durant la suite du XXI^e siècle. De plus, elle présente des inconnus et de l'imprévisible pouvant devenir conséquents. Dans le chapitre III.2 nous y reviendrons, sur la base de quatre sources naturelles de méthane.

Dans le RID de la contribution du GT1 au 5^e RE, la distinction entre profils SRES du 4^e RE et profils RCP du 5^e RE est brièvement présentée, en des termes quelques peu techniques : « *La dispersion des projections pour les RCP les plus intenses est moindre que pour les scénarios analogues utilisés dans le 4^e RE car, à la différence des scénarios d'émission SRES utilisés dans le 4^e RE, les RCP utilisés dans le 5^e RE sont définis comme des profils de concentration et donc les incertitudes liées au cycle du carbone affectant les concentrations atmosphériques en CO₂ ne sont pas prises en compte dans les simulations forcées par des concentrations.* »⁹⁶

Concernant l'amont des profils de concentration RCP, le RID de la contribution du GT1 au 5^e RE donne des fourchettes d'émissions de CO₂ compatibles : « *Les émissions cumulées de CO₂ pour la période 2012–2100 compatibles avec les concentrations atmosphériques de CO₂ des RCP, obtenues à partir de 15 modèles de système Terre CMIP5 sont comprises entre :*

- 140 et 410 GtC⁹⁷ pour le RCP2,6 ;
- 595 et 1 005 GtC pour le RCP4,5 ;
- 840 et 1 250 GtC pour le RCP6,0 ;
- et 1 415 et 1 910 GtC pour le RCP8,5. »⁹⁸

Avant de poursuivre, et afin de réduire les risques d'une utilisation sous-informée de ces fourchettes d'émissions, nous précisons que, plus loin dans notre thèse, nous verrons qu'elles ne prennent pas en considération une part, qui pourrait s'avérer conséquente, des incertitudes. En

96 RID. Section E, *Changements climatiques mondiaux et régionaux à venir*. Page 20.

97 GtC, Giga tonnes de carbone, soit 10⁹ tonnes de carbone.

98 Tableau RID.3, page 27.

particulier, ne sont pas prises en considération certaines rétroactions positives potentiellement importantes des sources et puits naturels de GES carbonés (CO₂ et CH₄ ; cycle du carbone) ou non carbonés (N₂O notamment).

Pour clore cette première présentation des scénarios, nous notons que le long de la chaîne ‘émissions de GES – changement climatique’, deux sources d’incertitude se présentent, celle du passage émissions anthropiques - concentration (qui est au cœur de notre thèse), puis celle du passage concentration – changement climatique (qui renvoie notamment à la question de la sensibilité climatique).

II.2.2 - Les modèles climatiques

II.2.2.1 - Généralités et limites

À la connaissance toujours plus approfondie des phénomènes physiques explicatifs du climat (qui incluent ici les aspects chimiques et biologiques), s’ajoute et se croise l’apport des données de l’observation empirique du passé climatique, jusqu’au passé le plus récent. Le tout forme les fondements d’une modélisation du climat riche d’outils mathématiques et statistiques de plus en plus sophistiqués et opérationnels grâce à des ordinateurs de plus en plus puissants.

II.2.2.1.1 - Le regard d’une philosophe des sciences

La plupart des modèles climatiques sont nationaux. Ainsi, nous avons le modèle français de l’institut Pierre-Simon Laplace, celui de Météo-France, les modèles américains, japonais, australiens, brésiliens, etc. Certains sont communs à plusieurs pays européens⁹⁹. A propos des modèles en général, citons un article d’Anouk Barberousse (2015, p.127) :

99 Voir par exemple le projet ESM2025, lequel réunit 20 organismes de recherche, représentant 7 pays européens (Autriche, Belgique, France, Allemagne, Norvège, Suède, Suisse et Royaume-Uni) et une université australienne. <https://meteofrance.fr/actualite/actualite-de-meteo-france/de-nouveaux-modeles-de-systeme-terre-pour-dessiner-les-futurs-climatiques>, vu le 9/01/2022.

- Tout d'abord, l'auteure fait une brève présentation de la diversité des modèles : « Certains modèles sont issus d'autres, qui les ont précédés. Mais les équipes scientifiques font aussi des choix différents sur la construction des modèles et sur ce qu'ils prennent en compte parce qu'on ne peut pas tout représenter dans un modèle. Ils ont pour conséquences des prédictions différentes. ».

- Puis, elle met l'accent sur le traitement statistique des résultats d'un modèle donné : « Puisque la physique du climat est bien connue, la climatologie, pour l'essentiel, c'est de la statistique. Certes, il y a une partie physique, ceux qui font les modèles sont en général des physiciens, mais pour le reste, faire de la climatologie, c'est surtout résoudre des problèmes de statistique très complexes. Les choix initiaux propres à chaque modèle sont bien connus (mode de construction du modèle, ce qui est pris en compte, paramétrisation¹⁰⁰...), mais il faut interpréter les résultats, c'est techniquement compliqué. »

- Enfin, elle s'arrête sur la compétition, au-delà de laquelle il y a la collaboration, stimulée par les attentes du GIEC et par les statistiques multi-modèles fondées sur la moyenne des résultats produits par les différents modèles : « Il y a une compétition entre ces modèles, et aussi entre laboratoires, comme dans n'importe quel domaine de recherche. La compétition fait progresser les modèles, mais il y a aussi une collaboration entre eux. Avec le quatrième rapport du GIEC, on a commencé à faire des statistiques multi-modèles, en prenant les résultats de plusieurs modèles (dont on fait la moyenne¹⁰¹). L'intention est d'aboutir à des résultats meilleurs que ceux des modèles nationaux et, sans d'ailleurs qu'on sache très clairement pourquoi, c'est ce

100 Approche de la notion de paramétrisation d'un modèle climatique

Dans les modèles, l'atmosphère et/ou les océans sont considérés comme un ensemble de parallélépipèdes rectangles (ou quasi-parallélépipèdes rectangles, car la terre est ronde) ; sinon, et bien plus rarement, comme un ensemble d'anneaux à section rectangulaire parallèles à l'équateur (volumes générés par la rotation autour de la Terre d'un rectangle situé à chaque instant dans un plan contenant l'axe de la Terre et dont deux côtés opposés sont verticaux). Dans l'atmosphère, un tel parallélépipède peut, par exemple, avoir pour dimension $l=100\text{km}$, $L=200\text{km}$, $h=1\text{km}$. Dans chacun de ces parallélépipèdes (idem pour les anneaux), au lieu des données climatiques (température, humidité, vent...) effectives, ce sont des estimations des moyennes de ces données qui sont prises en compte par les modèles ; cela répond à des contraintes informatiques. La détermination de la valeur de ces moyennes s'appelle la paramétrisation du modèle.

101 Le fait que le GIEC utilise la moyenne arithmétique est précisé par A. Barberousse plus haut dans son article.

qui se produit. Sans doute aurait-on pris conscience de ce phénomène sans la pression du GIEC, mais elle a certainement accéléré et intensifié les choses ».

La moyenne démocratique.

Pour, à partir des résultats de plusieurs modèles, établir un seul résultat, la méthode utilisée par les modélisateurs du climat repose généralement sur la moyenne arithmétique des résultats des différents modèles, c'est-à-dire la moyenne calculée en donnant le même poids à tous les résultats. D'où l'expression *moyenne démocratique*. Cette méthode résulte d'une incapacité scientifique à pondérer les différents résultats. En ce qui concerne le futur, nous verrons plus loin, sous-chapitre II.2.3, que l'appel à la *moyenne démocratique* révèle une certaine immaturité de la modélisation climatique, et répond à une volonté de quantifier à tout prix.

II.2.2.1.2 – Une diversité de modèles

Cette section reprend des données de la contribution du GT1 au 5^e RE¹⁰².

Chacun des quatre scénarios RCP du 5^e RE est élaboré à partir des résultats (simulations) issus de plusieurs modèles climatiques, soit 32, 42, 25 et 39 modèles¹⁰³ pour les profils respectifs RCP2,6, RCP4,5, RCP6 et RCP8,5. Ces modèles sont parfois classés en quatre catégories :

- les modèles climatiques simples (Simple Climate Models),
- les modèles de complexité intermédiaire (Earth System Models of Intermediate Complexity (EMICs)),
- les modèles climatiques détaillés (Comprehensive Climate Models),
- les modèles système Terre (Earth System Models (ESMs)).

¹⁰² RID, partie E, p19 ; Rapport intégral , chapitre 12, Executive summary. Page 1031.

¹⁰³ Confer chapitre 12, FAQ 12.1, figure 1 légende, page 1037.

Ce classement tend à cacher la grande diversité des modèles climatiques. Ainsi, tous les modèles climatiques reposent sur un découpage de l'espace (atmosphérique ou bien atmosphérique et océanique) en parallélépipèdes rectangles ; hormis certains, peu courants, qui présentent un découpage en anneaux rectangulaires parallèles à l'équateur. Certains ne portent que sur l'atmosphère globale ; d'autres considèrent aussi les océans et les échanges entre atmosphère et océans, souvent uniquement les échanges de dioxyde de carbone et d'énergie calorifique, mais parfois d'autres échanges tels que celui de méthane. Enfin, il y a les modèles climatiques système Terre, qui intègrent un grand nombre de phénomènes, d'interactions et de rétroactions physiques, chimiques et biologiques. Dans tous les cas, les limites de la puissance de calcul des ordinateurs, d'une part, et, d'autre part, de la quantité de données d'observation disponibles, pèsent fortement sur la précision de la modélisation.

II.2.2.1.3 – Les modèles et le Programme mondial de recherche sur le climat

Un grand nombre de simulations produites par ces modèles ont été utilisées pour élaborer les quatre projections climatiques RCP du 5^e RE. Cela s'est réalisé dans le cadre du CMIP5, c'est-à-dire dans le cadre de la cinquième phase du Projet de comparaison de modèles couplés (CMIP, signe anglais de Coupled Model Intercomparison Project). Le CMIP¹⁰⁴ a été lancé en 1995, sous les auspices du Programme mondial de recherche sur le climat (PMRC). Il a succédé à l'*Atmosphérique Model Intercomparison Project* (AMIP), mis en place en 1990 (soit deux ans après le lancement du GIEC), qui était un « *protocole permettant de comparer les résultats des différents modèles climatiques* », « *imposait à chaque modèle d'être lancé avec des conditions aux limites bien définies, ainsi qu'un format unique pour les données de sortie* » et a permis de « *comparer les modèles climatiques et de faire apparaître leurs différences et faiblesses respectives* » (Touzé-Peiffer L., 2018, p.104 – 105). A propos du CMIP, dans un bulletin de l'OMM daté de 2016 nous pouvons lire, sous la plume de David Carlson (Directeur du PMRC) et de

104 Pour en savoir plus sur le CMIP voir :

- <https://www.wcrp-climate.org/wgcm-cmip> ;
- <https://climatedataguide.ucar.edu/climate-model-evaluation/cmip-climate-model-intercomparison-project-overview>
- <https://pcmdi.llnl.gov/mips/amip/home/news/index.html> ;
- <http://pcmdi-cmip.llnl.gov/index.html?submenuheader=0>

Veronika Eyring : *“Le Projet de comparaison de modèles couplés (CMIP) (...) procure des bases indispensables aux études internationales. C’est un remarquable exemple de coordination scientifique et technique entre des dizaines de centres de modélisation du climat, auquel participent au-delà de mille chercheurs. Le Groupe d’experts intergouvernemental sur l’évolution du climat (GIEC) s’est basé sur différentes phases du CMIP pour établir plusieurs de ses rapports. Il reconnaît explicitement que le cinquième Rapport d’évaluation doit beaucoup à la cinquième phase du Projet. »*¹⁰⁵

II.2.2.1.4 – Le regard d’un climatologue

Cette section s’inspire d’un article¹⁰⁶ du climatologue et académicien français Hervé Le Treut, dont nous reprenons des extraits, cités entre guillemets.

Il faut le travail de 50 à 100 scientifiques pendant une dizaine d’années pour développer des modèles système Terre. Une vingtaine de laboratoires à l’échelle mondiale ont relevé ce défi. Ces modèles doivent intégrer des éléments très variés (cycle diurne, cycle saisonnier, reproduction de climats anciens, évènements El Niño ou La Niña, etc.). Il est à ce jour impossible d’optimiser les résultats sur l’ensemble des éléments. Par exemple, *« on peut détériorer gravement »* la simulation *« des précipitations neigeuses sur les régions polaires »* en améliorant celle *« des circulations océaniques tropicales »*.

Concernant la fiabilité des simulations du climat passé, y compris du passé le plus récent, *« le développement de la modélisation a été accompagné d’un effort international d’évaluation. Chaque groupe de modélisation participe ainsi à un protocole expérimental défini de manière internationale (expériences « CMIP » du Programme Mondial de Recherche sur le Climat), et*

105 Organisation météorologique mondiale. Bulletin n° : Vol 65 (2) – 2016.

<https://public.wmo.int/fr/ressources/bulletin/1%E2%80%99apport-du-projet-de-comparaison-de-mod%C3%A8les-coupl%C3%A9s-%C3%A0-la-science-du-climat>

106 Hervé Le Treut. *Qu’est-ce qu’un modèle de climat ?* Site Le climat en question. 25-02-2014.

<https://www.climat-en-questions.fr/reponse/fonctionnement-climat/modele-climat-par-herve-treut> . Il s’agit d’un site *« créé par l’Institut Pierre-Simon Laplace, une fédération de six laboratoires publics de recherche en sciences de l’environnement, avec le soutien de l’Institut national des sciences de l’Univers (INSU) du CNRS »*.

les résultats de chaque modèle sont confrontés à la réalité par des groupes de recherche très nombreux (près d'un millier) qui ne font pas un travail de modélisation mais d'analyse des modèles, pour une région du monde ou pour un processus ciblé. Jusqu'à présent, il n'a jamais été possible de trouver un modèle universellement meilleur ou universellement moins bon que les autres : c'est très souvent la moyenne des modèles qui fournit le résultat le plus réaliste. »

II.2.2.1.5 - Ce qu'en disait le GIEC en 1990, puis en 1997

En 1990, dans son 1^{er} rapport, dans un texte intitulé *Quels outils utilisons-nous pour prévoir le climat futur, et comment les utilisons-nous ?* le GIEC précisait : « Une manière (...) qui pourrait se révéler utile, de prévoir la physionomie future du climat est de rechercher dans le passé des périodes au cours desquelles la température globale moyenne a été semblable à celle que nous prévoyons pour l'avenir, et d'admettre alors que les variations spatiales passées sont analogues à celles qui se produiront à l'avenir. Pour que l'analogie soit valable, il faut aussi que les facteurs de forçage (par exemple, les gaz à effet de serre, les variations de l'orbite terrestre) et d'autres conditions (par exemple, la couverture de glace, la topographie, etc.) soient comparables : des comparaisons directes avec des situations climatiques pour lesquelles ces conditions ne sont pas remplies sont difficiles à interpréter. On n'a pas retrouvé de situations qui présentent une analogie avec les changements climatiques que doivent provoquer les gaz à effet de serre. »¹⁰⁷. Ainsi ce premier outil fondé sur une hypothétique période passée isomorphe à la période présente reste une impasse.

Dans le même texte, le GIEC présentait un outil alternatif pour prévoir le climat futur « L'outil le plus perfectionné dont nous disposons pour prévoir le climat futur est connu sous le nom de *Modèle de la circulation générale (MCG)* » et précisait « les données paléoclimatiques peuvent aider à mieux comprendre les processus climatiques et à valider les modèles du climat ». Nous notons l'emploi du terme prévoir, « prévoir le climat futur », dans la continuité des propos sur le désenchantement du monde tenus par Max Weber en 1919. Nous notons, en outre, l'utilisation des climats passés pour aider à valider l'outil de prévision du climat futur ; climats passés dont nous avons vu qu'ils se situaient dans la période géologique révolue du quaternaire où les réchauffements étaient structurellement différents du réchauffement en cours.

107 Contribution du GT1 au 1^{er} RE, sous chapitre 5.2, encart de la page 82.

Toutefois, ce texte extrait du 1^{er} RE du GIEC doit être resitué dans le contexte plus mesuré de l'ensemble de ce Rapport d'évaluation. Nous verrons, au début du chapitre III.3, que le RID de ce 1^{er} RE alertait très clairement et de façon étoffée sur l'importance du *Reste causal* associé aux modèles et aux scénarios présentés dans ce rapport, ainsi que sur la probable édulcoration du changement climatique présentée par ces modèles et scénarios, et enfin sur les possibles « *surprise venant de la complexité du système* »¹⁰⁸ et sur les « *problèmes imprévus et zones d'ignorance* ».

Actuellement, plus de trois décennies sont passées, et la paléoclimatologie n'a toujours pas découvert de situations climatiques antérieures analogues à celle du changement climatique actuel. Si bien que, l'outil utilisé de façon privilégiée pour explorer le climat du XXI^e siècle reste la modélisation climatique.

En février 1997, dans un document élaboré suite à une demande politique des parties (les États membres) de la CCNUCC¹⁰⁹, mais qui n'a pas été soumis à l'approbation de l'assemblée plénière du GIEC, ce dernier tenait un propos à la fois modeste et étayé : « *Tous les modèles du système climatique employés dans le Rapport du GT1 (du 2^e RE (1995)) ont été évalués quant à leur capacité de reproduire les caractéristiques clés du climat actuel ainsi que les changements passés et paléoclimatiques. Même s'il est impossible de confirmer la validité de ces modèles pour la prévision des conditions futures, leur aptitude à rendre compte de diverses caractéristiques du système atmosphère-océan-biosphère et de changements observés récemment démontre leur utilité dans la préparation de projections sur l'évolution du climat. Toutefois, de*

108 Page XIII.

109 Publié sous la direction de John T. Houghton, L. Gylvan Meira Filho, David J. Griggs, Kathy Maskell. *Introduction aux modèles climatiques simples employés dans le Deuxième Rapport d'évaluation du GIEC*. Février 1997. Page 5. <https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/03/paper-II-fr.pdf>.

Ce document était accompagné de la précision : « *Le présent document technique du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat a été élaboré à la demande des parties à la Convention-cadre des Nations Unies sur les changements climatiques. Les éléments d'information rassemblés ici ont été vérifiés par des experts et divers gouvernements, mais n'ont pas été examinés par le Groupe aux fins d'une éventuelle acceptation ou approbation.* »

nombreuses incertitudes entachent encore la modélisation du système climatique. On apprécie très mal les changements qui pourraient survenir dans certains processus, comme ceux associés aux nuages, au sein d'un climat modifié. L'effet des aérosols sur le bilan radiatif du climat reste incertain. Les fluctuations, difficiles à prévoir, de la circulation océanique pourraient avoir des répercussions significatives sur les changements climatiques régionaux et mondiaux. Il pourrait se produire des variations imprévues du flux de carbone entre l'atmosphère, la biosphère terrestre et les océans. On peut cependant affirmer que la recherche améliore notre compréhension des principaux processus en jeu et affine leur représentation au moyen de modèles. ». Ainsi, nous trouvons dans ce texte de 1997 une présentation synthétique de l'apport et des limites des modèles climatiques qui ont servi à l'élaboration de la contribution du GT1 au 2^eRE publié en 1995, et en particulier à l'élaboration des scénarios pour le XXI^e siècle. Aussi, nous y trouvons une liste de sujets dont le devenir durant le XXI^e siècle présente des incertitudes fortes avec en conséquence une modélisation dont les résultats portant sur le XXI^e siècle ne peuvent être que de simples projections ; c'est d'ailleurs très justement ce terme qu'utilise le GIEC depuis son 2^e RE.

II.2.2.1.6 - Vingt et un ans plus tard : une insaisissable complexité

Durant les vingt années qui ont suivi cette publication du GIEC de 1997, la connaissance scientifique a fortement évolué ; pour autant, aurait-elle apporté à la modélisation une plus grande capacité de prédiction climatique ? Ludovic Touzé-Peiffer (2018, p.128) propose une réponse :

« (...) nous avons développé des représentations virtuelles de plus en plus détaillées et de plus en plus réalistes du globe terrestre. Certes toujours simplifiées, ces planètes virtuelles nous ont aidés à mieux comprendre celle bien réelle dont nous foulons tous les jours le sol.

Mais plus notre compréhension de la « machine terrestre » s'est affinée, plus nous avons pris conscience de sa formidable complexité. Les mécanismes du climat sont subtils et les nombreuses rétroactions en jeu nous échappent encore largement. Les progrès réalisés, certes remarquables, en appellent d'autres.».

II.2.2.1.7 – Déglaciations passées, une approche des lois qui président au réchauffement actuel ?

Selon Valérie Masson-Delmotte (2011, p. 45), « *Les modèles de climat sont couramment utilisés pour étudier les climats passés. (...) Il y a quelques années, il fallait se contenter de simulations ponctuelles (pour une période passée donnée). Il est maintenant possible d'explorer la dynamique des variations climatiques passées sur plusieurs siècles, plusieurs millénaires (à l'aide des modèles les plus complexes) ou plusieurs cycles climatiques¹¹⁰ (grâce à des modèles de complexité intermédiaire¹¹¹). Mais il reste des points de blocage importants dans la compréhension des variations climatiques passées. Cela porte, par exemple, sur le détail des processus à l'origine des changements glaciaire-interglaciaire du cycle du carbone ou sur les changements d'intensité des périodes interglaciaires au cours du dernier million d'années.* ».

Dans son ouvrage de 2011, V. Masson-Delmotte pointe ainsi des lacunes importantes dans la connaissance des processus de réchauffements/déglaciations du Quaternaire. Par ailleurs, nous rappelons que le système climatique et plus largement le système bio-terre sont sortis du Quaternaire (voir le chapitre I.2). Si bien qu'une approche du réchauffement climatique actuel basée sur la connaissance que nous avons des processus de réchauffement du Quaternaire peut, certes, présenter un intérêt scientifique, en revanche elle pourrait nous détourner de la réalité et nous amener à sous-estimer les risques associés au processus de réchauffement en cours.

V. Masson-Delmotte, climatologue française, était alors fortement investie dans la rédaction de la contribution du GT1 au 5^e RE, dont elle fut auteure coordinatrice du chapitre 5 et auteure principale du Résumé technique et du RID ; avant d'être coprésidente du GT1 sur la période de rédaction du rapport suivant, le 6^e RE, ce qui lui permit notamment de jouer un rôle de tout premier plan dans la rédaction du *Rapport spécial sur les conséquences d'un réchauffement planétaire de 1,5 °C* (2018), dont plus loin nous montrerons l'importance historique.

En 2013, année de publication de la contribution du GT1 au 5^e RE, V. Masson-Delmotte publia un document¹¹² dont nous nous inspirons pour présenter à grands traits les connaissances, ac-

110 Soit plusieurs centaines de milliers d'années.

111 Modèles complexes appliqués avec des grilles comportant un nombre réduit de mailles.

112 Valérie Masson Delmotte. *Que nous apprend l'étude des climats du passé ?* 18 juillet 2013.

quises en 2013, des processus de réchauffement/déglaciation du Quaternaire. Au départ il y avait une augmentation de l'ensoleillement d'été entraînant un réchauffement estival polaire, puis une diminution des zones couvertes de neige et de banquise. Ainsi l'albédo diminuait, ce qui amplifiait le réchauffement. Ce dernier s'accompagnait alors d'un accroissement des pluies sur les continents et d'une hausse de la production de méthane dans les zones humides, d'où une augmentation de l'effet de serre, ce qui amplifiait à nouveau le réchauffement. Les changements de température et de circulation océanique avaient alors pour conséquence de stocker moins de dioxyde de carbone dans les eaux profondes océaniques¹¹³ et entraînaient une augmentation de la teneur en gaz à effet de serre dans l'atmosphère, ce qui amplifiait à nouveau le réchauffement. D'où un processus de précipitation du réchauffement.

De nos jours, nous avons de même un processus en spirale. Toutefois, nous rappelons que la source, le facteur initial, n'est pas une augmentation de l'ensoleillement d'été entraînant un réchauffement polaire estival, mais des émissions anthropiques massives de GES, cela alors que le climat se situait déjà au maximum ou proche du maximum d'une période chaude des cycles climatiques du Quaternaire. Néanmoins, l'ensemble des éléments cités par V. Masson-Delmotte se mettent aujourd'hui en mouvement et contribuent au risque d'un emballement du réchauffement.

Un certain nombre de phénomènes complémentaires pourraient demain (voire dès aujourd'hui pour certains parmi eux) se mettre en mouvement et contribuer à un emballement du changement climatique. Nous les retrouverons dans la troisième partie de notre thèse (chapitre 2 et 3). Certains de ces phénomènes, tels que la fonte de pergélisol (Zimov et al., 2009 ; Zech et al., 2011), opéraient durant les déglaciations du Quaternaire, bien qu'ils n'aient pas été cités dans l'article de V. Masson-Delmotte, et bien que, par ailleurs, ils n'aient pas été pris en compte dans les scénarios du 5^e RE du GIEC. D'autres, inédits, sont dus à l'activité humaine (zones mortes

https://www.climat-en-questions.fr/reponse/mecanismes-devolution/etude-climats-passe-par-valerie-masson-delmotte#footnote1_sx81z0w Vu le 29/11/2021.

113 En raison de plusieurs facteurs, dont notamment : la diminution de la capacité de l'eau à contenir du dioxyde de carbone lors d'une augmentation de sa température ; la diminution de la circulation verticale d'eau de mer (et de ses composés) lors de l'augmentation de la température de la couche supérieure des océans (car cette dernière devenant moins dense, présente moins de mélange avec la couche inférieure froide et plus lourde).

des océans, sols anthropisées au détriment des forêts...). Il s'avère qu'ensemble, ils constituent le *Reste causal* associé aux scénarios pour le XXI^e siècle du 5^eRE.

II.2.2.2 - Du passé et du futur

Selon Silvio O. Funtowicz and Jerome R. Ravetz (1993, p.742) : « *Ces nouvelles questions politiques (celles du risque et de l'environnement) présentent des caractéristiques communes qui les distinguent des problèmes scientifiques traditionnels. Elles sont universelles dans leur échelle et ont un impact à long terme. Les données sur leurs effets (...) sont radicalement insuffisantes. Les phénomènes, nouveaux, complexes et variables, sont eux-mêmes mal compris. La science ne peut pas toujours fournir des théories bien fondées basées sur des expériences*

pour l'explication et la prédiction, mais ne peut souvent obtenir au mieux que des modèles mathématiques et des simulations informatiques, qui sont essentiellement non testables. Sur la base de ces données incertaines, des décisions doivent être prises, dans des conditions d'urgence. Par conséquent, la politique ne peut pas se fonder sur des prédictions factuelles, mais uniquement sur des estimations politiques. » (VOA¹¹⁴)

II.2.2.2.1 – La modélisation et le mur du futur en situation de bifurcation

Les données d'observation dont le traitement statistique permet d'ajuster et de valider les modèles climatiques sont nécessairement issues du passé. Aucune donnée d'observation du futur ne peut alimenter les résultats de la modélisation. C'est là une évidence. Or, en raison d'un ensemble de faits d'origine anthropique, un changement climatique et plus largement une bifurcation du système-Terre hors du Quaternaire ouvrent une structure du système climatique inédite, ce qui fait obstacle à toute tentative de raisonnement ou de calcul par isomorphisme ou par continuité entre le passé et le futur (confer Annexe 1 et chapitre I.2). Ainsi, la validation des modèles par la paléoclimatologie et par l'analyse des données accumulées ces dernières décennies ne signifie pas que le domaine de validité des modèles ait franchi le mur du futur. Le propos suivant, tenu en 2014 par le climatologue français Hervé Le Treut, illustre cette limitation au Quaternaire, voire une limitation aux temps récents du Quaternaire : *« L'allongement de la durée des simulations a aussi permis d'explorer le comportement de la planète numérique sur des périodes de plus en plus longues, et de tester la capacité des modèles à reproduire des climats passés. Par exemple, le dernier maximum glaciaire, il y a 21 000 ans, ou encore le climat chaud de l'Holocène entre 10 000 et 5 000 ans avant l'époque actuelle. »¹¹⁵*

114 *« These new policy issues have common features that distinguish them from traditional scientific problems. They are universal in their scale and long-term in their impact. Data on their effects (...) are radically inadequate. The phenomena, being novel, complex and variable, are themselves not well understood. Science cannot always provide well founded theories based on experiments for explanation and prediction, but can frequently achieve at best only mathematical models and computer simulations, which are essentially untestable. On the basis of such uncertain inputs, decisions must be made, under conditions of some urgency. Therefore policy cannot proceed on the basis of factual predictions, but only on policy forecasts. ».*

115 *Qu'est-ce qu'un modèle de climat ? Op. cit.*

Finalement, si la connaissance du processus des réchauffements antérieurs peut nourrir la connaissance du climat futur, cette connaissance du passé pourrait tout aussi bien induire en erreur si elle était appliquée plus ou moins selon un isomorphisme ou une continuité Passé-Futur qui n'existe pas. En 1995, dans son 2^e RE, sur cette question Passé-Futur le GIEC exprimait ceci: « *Il est d'autant plus probable que l'avenir nous réservera des surprises et des changements rapides inattendus que l'évolution envisagée du climat dépasse les limites de nos connaissances empiriques (qui se limitent aux incidences connues des variations des climats du passé)* »¹¹⁶. Ici le propos du GIEC reconnaissait tout à la fois d'éventuelles ruptures structurelles ou bifurcations entre le climat passé et le climat futur, et des trous dans la connaissance des climats passés ; par là même il reconnaissait la prudence nécessaire dans toute interprétation scientifique des scénarios du 2^e RE.

En 2013, dans le Résumé technique de sa contribution au 5^e RE, le GT1 précisait : « *Depuis le quatrième Rapport d'évaluation, l'inclusion de simulations du paléoclimat dans le cadre du projet PMIP3 (projet de comparaison de modèles paléoclimatiques) / CMIP5 (projet de comparaison de modèles couplés) a permis de lier plus étroitement les informations paléoclimatiques aux projections quant au climat à venir. Des informations paléoclimatiques sur l'Holocène moyen (6 ka), le dernier maximum glaciaire (21 ka environ) et le dernier millénaire ont permis d'éprouver la capacité des modèles à simuler de façon réaliste l'ampleur et les caractéristiques à grande échelle des changements passés.* »¹¹⁷. Notons que le terme employé reste « projection », lequel ne peut se confondre ni avec prédiction climatique ni avec estimation du climat futur. Ainsi, selon le GIEC, entre le 4^e RE et le 5^e RE, a été acquise une plus grande reconnaissance scientifique de la capacité des modèles à simuler de façon réaliste le passé, d'une part ; a été constatée une plus grande utilisation de la connaissance du passé dans les projections portant sur le futur, d'autre part ; mais il ne dit rien de la capacité de ces modèles à simuler de façon réaliste les changements futurs. Le propos du GIEC est ici, en 2013, bien moins explicite que celui de 1995 que nous avons cité plus haut ; mais il demeure néanmoins rigoureux et prudent. Pour conclure, nous citons Jouni Räisänen (2007, Abstract) : « *Dans l'ensemble, le lien*

116 Section 3.5 du *Document de synthèse des informations scientifiques et techniques relatives à l'interprétation de l'article 2 de la convention-cadre des nations unies sur les changements climatiques.*

117 P.77

entre la capacité des modèles à simuler le climat actuel et la capacité à simuler les changements climatiques futurs est mal connu. » (VOA¹¹⁸).

II.2.2.2.2 - À quatre et finalement trois temps

Les fondements et l'apport des modèles climatiques nous amènent à proposer plusieurs temps :

i - Le passé récent

Tout d'abord, il y a le passé récent, pour lequel nous disposons de nombreuses données climatiques. A son propos, en 2013 V. Masson-Delmotte écrivait : « *Les grands réseaux de mesures météorologiques permettent de connaître l'évolution du climat depuis environ 150 ans, ce qui est relativement bref* »¹¹⁹. De plus, sous sa plume nous trouvons : « *S'il est possible de tester rigoureusement les modèles de climat quant au spectre de la variabilité à court terme (jusqu'à quelques décennies), les observations directes (météorologiques, satellitaires...) portent sur une période trop courte par rapport à la variabilité générée par les modèles de climat sur le plus long terme.* » (V. Masson-Delmotte, 2011, p.83). Si bien que ce passé récent est lui même découpé en deux sous-parties :

- La période allant du milieu du XXe siècle à nos jours, pour laquelle nous disposons de nombreuses données climatiques continues sur l'ensemble du globe.
- La période allant approximativement de 1880 à 1950, durant laquelle ont été récoltées des données climatiques situées pour l'essentiel sur les terres continentales de l'hémisphère Nord.

A propos de ces deux sous-parties, nous pouvons aussi citer Ludovic Touzé-Peiffer (2018, p.127) : « *Les connaissances sur le climat que nous avons acquises au cours des dernières décennies sont fascinantes. Au milieu du XXe siècle, la Terre apparaissait encore comme une planète immense, inexplorée. Les mesures de l'atmosphère étaient restreintes aux pays développés* »

118 « Overall, the connection between model skill in simulating present-day climate and the skill in simulating future climate changes is poorly known. »

119 Valérie Masson-Delmotte. *Que nous apprend l'étude des climats du passé ?* Juillet 2013. https://www.climat-en-questions.fr/reponse/mecanismes-devolution/etude-climats-passe-par-valerie-masson-delmotte#footnote3_io61h6y Vu le 5/01/2022.

pés, celles des océans se limitaient à quelques croisières océanographiques épisodiques. Météorologues et océanographes observaient notre planète, mais de manière locale, en se limitant à des zones géographiques précises.

Depuis, des progrès ont permis de faire beaucoup mieux. Les satellites et le développement de réseaux d'observation globaux ont progressivement fourni une image extraordinairement étayée de notre planète. Ils nous permettent désormais de surveiller l'atmosphère et les océans en continu, presque partout dans le monde. ».

ii - Le passé ancien

Il y a le passé ancien, pour lequel nous ne disposons que de données éparses. Ce passé peut être découpé en deux sous parties, en fonction de la quantité de données dont nous disposons. La période géologique du Quaternaire est la plus récente. Son climat est largement plus documenté que les climats des temps géologiques qui la précèdent.

La période du Quaternaire a débuté il y a 2,6 millions d'années et nous proposons d'en dater la fin aux environs de 1880. Son climat poursuivait une variation cyclique entre phases glaciaires et phases inter-glaciaires. Des données de cette période, portant essentiellement sur les 800 000 dernières années, pour une bonne part obtenues grâce à l'analyse des calottes glacières, permettent de confirmer la validité des modèles au-delà du passé récent, mais aussi de les ajuster ; selon V. Masson-Delmotte, 2013, *« les modèles de climat parviennent à représenter correctement l'amplitude des variations de température glaciaires-interglaciaires (de l'ordre de 5 °C en moyenne globale) et la structure de ces changements, plus prononcés dans les régions polaires que près de l'équateur. »*¹²⁰. Réciproquement, la modélisation climatique contribue à la connaissance du climat du Quaternaire ; nous citons ici à nouveau Valérie Masson-Delmotte, *« La modélisation des climats passés (...) permet également de mieux comprendre les mécanismes de ces changements passés. »*¹²¹.

iii - Le futur

120 Extrait d'un article de 2013 : https://www.climat-en-questions.fr/reponse/mecanismes-devolution/etude-climats-passe-par-valerie-masson-delmotte#footnote3_io61h6y .Vu le 5/01/2022.

121 Op. cit.

Nous définissons ici le *futur proche*, que nous opposons au *futur de moyen ou long terme*, comme la période future durant laquelle la structure climatique effective serait en bonne correspondance avec la structure des modèles climatiques numériques sur lesquels reposent les scénarios du 5^e RE. Cette définition posée, le terme du *futur proche* serait la borne supérieure du domaine temporel de validité des modèles climatiques utilisés pour les travaux du GIEC.

Le 5^e rapport du GIEC séparait le XXI^e siècle (ou plus exactement la période 2013-2100) en deux temps. L'un allant jusqu'en 2043, 2050¹²², l'autre jusqu'en 2100. Cette coupure du XXI^e siècle en deux temps, est par définition sans rapport avec celle que nous définissons entre futur proche et future de moyen ou long terme. En effet, elle coupe le XXI^e siècle en une période durant laquelle les projections climatiques associées aux 4 profils de concentration RCP sont proches et une période où ces projections divergent. Un extrait du Résumé technique de la contribution du GT1¹²³ présente ce point : « *Les mesures d'atténuation qui seraient lancées maintenant conformément à ces scénarios (scénarios techno-socio-économiques associés aux différents profils RCP) ne produisent pas de résultats sensiblement différents en matière de changements climatiques pour les 30 années à venir ou à peu près, alors qu'après la moitié du XXI^e siècle, les changements climatiques à long terme sont sensiblement différents selon le scénario.* ».

Le RID de la synthèse de ce 5^e RE apporte des compléments, notamment sur le contenu du *Reste causal* associé aux projections : « *Le changement de la température moyenne à la surface du globe pour la période 2016-2035 par rapport à 1986-2005 est semblable dans les quatre profils représentatifs d'évolution de concentration (RCP) et sera probablement compris entre 0,3 °C et 0,7 °C (degré de confiance moyen). Cette fourchette repose sur l'hypothèse d'une absence d'éruption volcanique intense ou de changement dans certaines sources naturelles (par exemple, méthane (CH₄) et oxyde nitreux (N₂O)), ou encore de changement inattendu de l'éclairement énergétique solaire total.* »¹²⁴. Cet extrait d'un Résumé à l'intention des décideurs signifie, entre autres choses, que certaines sources naturelles de GES pourraient connaître une activité suffisamment accrue entre 2014 (date de publication de ce RID) et 2035 pour que la

122 Voir section 11.1, page 958.

123 P. 79.

124 RID de la synthèse du 5^e RE, section 2.2.1, p.63.

concentration effective de GES dépasse les niveaux des profils RCP, avec pour conséquence, en ce qui concerne l'élévation de la température terrestre sus-citée, une sortie de la fourchette 0,3°C – 0,7°C. Ce qui signifie que la structure climatique effective ne serait plus en bonne correspondance avec la structure des modèles climatiques dès avant 2035.

La fin du *futur proche*, c'est-à-dire le moment où la structure du climat réel divergera de la structure des modèles climatiques numériques utilisés pour construire les scénarios du 5^e RE, pourrait être due à des causes variées, dont un niveau devenu significatif de l'expression de phénomènes causaux non prise en compte par les modèles, par exemple des sources naturelles de GES. Or, ce moment est imprévisible, ne peut être daté, en raison des aspects imprévisibles (temporalité, ampleur...) de nombreux phénomènes causaux situés dans le *Reste causal* de ces modèles, en particulier de phénomènes amplificateurs du réchauffement climatique (nous y reviendrons notamment dans le chapitre III.2). Finalement, l'avenir est incertain, y compris l'avenir proche, et la limite entre ce que nous avons défini comme étant le *futur proche* et le *futur de moyen long termes* pourrait être très proche, voire même être déjà dépassée en cette année 2022. En effet, nous verrons, par exemple (Chapitre III.2), que sur la période 2015-2021 la température terrestre était supérieure de 0,6°C à celle de la période 1986-2005, soit déjà proche de la borne supérieur de la fourchette 0,3°C – 0,7°C prévue pour 2016-2035 selon le 5^e RE. Dans le même temps, une autre divergence s'exprimait : le taux de méthane dans l'atmosphère connaissait une croissance dont la rapidité n'avait pas été anticipée par le 5^e RE. Nous précisons de suite qu'il ne faut pas voir une relation de cause à effet entre ces deux phénomènes suffisante pour expliquer le premier d'entre eux (le réchauffement de 0,6°C) ; nous verrons qu'un autre phénomène entre en jeu.

II.2.3 - La *moyenne démocratique*

II.2.3.1 – Définition et première analyse

L'absence de prise en compte de phénomènes causaux potentiellement puissants constitue une insuffisance des scénarios climatiques du GIEC. Cependant, d'autres biais méthodologiques se présentent. Un exemple réside dans l'utilisation de la moyenne arithmétique, encore appelée moyenne non pondérée, que nous retrouvons sous l'expression *moyenne démocratique* à propos des scénarios climatiques. Il s'agit de la moyenne calculée en affectant à chaque résultat d'une série considérée un poids égal à celui de tout autre résultat. Pour les 4^e et 5^e RE¹²⁵, cette *moyenne démocratique* a été utilisée pour agréger les résultats issus de différents modèles. Toutefois, ce mode de calcul ne résulte pas de la connaissance du fait que chaque modèle aurait le même poids effectif que tout autre modèle, mais d'une incapacité à affecter de façon fondée scientifiquement des poids aux différents modèles. Le texte intégral du 5^e RE (voir ci-après) pointe des insuffisances majeures de cette *moyenne démocratique*, dont notamment l'absence de prise en considération de la dépendance entre certains modèles, des travers communs à plusieurs modèles ou encore la diversité des performances des modèles.

Finalement, faute de pouvoir scientifiquement pondérer les modèles, le choix a été fait d'utiliser une moyenne non pondérée, c'est-à-dire la moyenne la plus simple à mettre en œuvre. Cependant, la méthode ainsi suivie ne respecte pas les règles scientifiques fondamentales qui s'imposent au calcul d'une moyenne. Mais, ce choix de la facilité, qui est en fait le choix de la faisabilité, doit être considéré dans le contexte de la dynamique scientifico-politique qui fonde le GIEC, elle-même située dans le contexte de la quantophrénie.

II.2.3.2 – Le point de vue du GIEC

Dans cette section, nous reproduisons des extraits de la contribution du GT1 au 5^e RE

Rapport complet

125 Voir II.2.2.1.1 - Le regard d'une philosophe des sciences.

Chapitre 9¹²⁶ : « L'approche la plus courante pour caractériser les résultats des Ensembles multi-modèles (EMM) consiste à calculer la moyenne arithmétique des résultats des modèles individuels, appelée moyenne multi-modèle non pondérée. Cette approche d'"un vote par modèle" donne un poids égal à chaque modèle climatique indépendamment (1) du nombre de simulations auxquelles chaque modèle a contribué, (2) de l'interdépendance des modèles ou (3) de la performance de chaque modèle dans l'évaluation objective. La moyenne multi-modèle sera souvent utilisée dans ce chapitre. Certains modèles climatiques ont une lignée commune et partagent donc des biais communs. Par conséquent, une collection telle que le CMIP5 EMM ne peut être considérée comme un échantillon aléatoire de modèles indépendants. Cette complexité crée des défis quant à la meilleure façon de faire des inférences quantitatives sur le climat futur, comme nous le verrons plus en détail au chapitre 12. » (VOA¹²⁷)

Chapitre 12¹²⁸ : « Dans certains cas, lorsqu'une relation significative est détectée entre la performance des modèles et la fiabilité de leurs projections futures, certains modèles peuvent être exclus. Cependant, en général, une question de recherche reste ouverte : trouver des connexions significatives de ce type qui justifient une certaine forme de pondération à travers l'ensemble des modèles produisant des projections futures agrégées significativement différentes des résultats de la méthode un modèle-un vote. Par conséquent, la plupart des analyses effectuées pour ce chapitre font appel à tous les modèles disponibles dans les ensembles, un poids égal étant accordé à chacun d'entre eux, sauf indication contraire. » (VOA¹²⁹)

126 Section 9.2.2.3 - Statistical Methods Applied to Ensembles, page 755.

127 « The most common approach to characterize MME (Multi-Model Ensembles) results is to calculate the arithmetic mean of the individual model results, referred to as an unweighted multi-model mean. This approach of 'one vote per model' gives equal weight to each climate model regardless of (1) how many simulations each model has contributed, (2) how interdependent the models are or (3) how well each model has fared in objective evaluation. The multi-model mean will be used often in this chapter. Some climate models share a common lineage and so share common biases. As a result, collection such as the CMIP5 MME cannot be considered a random sample of independent models. This complexity creates challenges for how best to make quantitative inferences of future climate as discussed further in Chapter 12. »

128 Une première partie de cet extrait se situe page 1040 et une seconde page 1044, entre les deux se trouve un encadré de trois pages.

129 « In some cases when a significant relation is detected between model performance and reliability of its future projections, some models may be excluded but in in general it remains an open research question to find signi-

Résumé technique¹³⁰

L'expression « moyenne multi-modèle » ou « moyenne des modèles » apparaît à plusieurs reprises dans ce RT, par exemple « *Configurations de la température (colonne de gauche) et évolution des précipitations en pourcentage (colonne de droite) selon la moyenne des modèles CMIP3 (première ligne) et la moyenne des modèles CMIP5 (seconde ligne)* »¹³¹. Du fait de l'absence de précision, moyenne signifie ici sans ambiguïté moyenne arithmétique, c'est-à-dire *moyenne démocratique*. Mais, dans ce Résumé technique, aucun passage n'indique que cette *moyenne démocratique* est au fondement des scénarios climatiques du GIEC couvrant le XXI^e siècle.

Un court et unique passage du RT aborde la question de la moyenne des résultats des modèles : « *Il n'existe toujours pas de stratégie universelle permettant d'exploiter la performance passée d'un modèle en insérant une pondération relative à ce modèle dans une moyenne d'ensemble multimodèle de projections climatiques.* »¹³². Le fait de dire ici qu'il n'existe pas de stratégie universelle ne dit pas quelle stratégie particulière a été choisie. Ainsi le choix qui est fait, celui de la stratégie de la *moyenne démocratique*, est un non dit de ce RT.

Résumé à l'intention des décideurs

L'expression « moyenne multi-modèles » est employée 9 fois, soit à propos d'un élément particulier (le contenu thermique de l'océan superficiel), soit dans des notes rédigées en petits caractères qui accompagnent des figures¹³³.

ficant connections of this kind that justify some form of weighting across the ensemble of models and produce aggregated future projections that are significantly different from straightforward one model–one vote ensemble results. Therefore, most of the analyses performed for this chapter make use of all available models in the ensembles, with equal weight given to each of them unless otherwise stated. »

130 Page 76.

131 Encadré RT.6 - Figure 1, page 80.

132 Encadré RT.4 - Évaluation des modèles, p.76.

133 Fig. RID7 et RID8.

Mais, la question de la *moyenne démocratique* n'est pas abordée dans le RID. Ainsi, l'existence d'un biais notable présenté par les scénarios, à savoir l'usage de la *moyenne démocratique* aux multiples biais, n'est pas portée à la connaissance des « décideurs ».

II.2.4 - La construction et la présentation des incertitudes et de l'estimation de la fiabilité des résultats

II.2.4.1 - La demande du politique

Le Résumé technique de la contribution du GT1 au 5^e RE précise « *Conformément aux orientations qui ont été données aux auteurs principaux du cinquième Rapport d'évaluation du GIEC en vue d'assurer un traitement cohérent des incertitudes (Guidance Note for Lead Authors of the IPCC Fifth Assessment Report on Consistent Treatment of Uncertainties¹³⁴), dans le Résumé technique et le Résumé à l'intention des décideurs publiés par le Groupe de travail I, deux critères sont utilisés pour définir la fiabilité des principaux résultats* »¹³⁵. Puis le texte se poursuit en présentant ces deux critères, présentation que nous reproduisons dans notre section II.2.4.2 suivante.

Nous pouvons noter que « *Lors de sa 32^e session, le groupe d'experts du GIEC a demandé instamment l'application de cette note d'orientation.* »¹³⁶ (VOA¹³⁷)

134 https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2017/08/AR5_Uncertainty_Guidance_Note.pdf

135 GT1. Document en français contenant le RID, le Résumé technique et la Foire aux questions. Page 36.

136 Voir page 1 de la dite note.

137 « *At its 32nd session, the IPCC Panel urged the implementation of this Guidance Note.* » ?

II.2.4.2 - Synthèse de ce qu'en dit le Résumé à l'intention des décideurs du GT1¹³⁸

Selon le RID (GT1, 5^e RE), l'estimation de la fiabilité des résultats « repose sur l'appréciation que les comités de rédaction¹³⁹ ont faite des connaissances scientifiques sous-jacentes » et est définie à l'aide de deux critères, l'un qualitatif, l'autre quantitatif.

Le critère qualitatif exprime le degré de confiance en la validité du résultat. Il « représente une synthèse qualitative du jugement » du comité de rédaction concerné. Il « découle de la nature, de la quantité, de la qualité et de la cohérence des éléments examinés (compréhension mécaniste, théorie, données, modèles, avis d'experts, etc.), ainsi que du degré de cohérence des études scientifiques prises en compte ». Cinq qualificatifs sont utilisés pour exprimer le degré de confiance : très faible, faible, moyen, élevé et très élevé.

Le critère quantitatif, quant à lui, exprime l'incertitude liée à un résultat. Il se présente sous la forme de probabilités, généralement des intervalles de confiance, et « se fonde sur l'analyse statistique des observations ou des simulations effectuées à l'aide de modèles, ou des deux, associée à des avis d'experts ». La terminologie suivante est utilisée pour caractériser le degré de probabilité :

Probabilité de :

99–100 % Quasiment certain

95–100 % Extrêmement probable

90–100 % Très probable

66–100 % Probable

50–100 % Plus probable qu'improbable

33–66 % À peu près aussi probable qu'improbable

0–33 % Improbable

0–10 % Très improbable

0–5 % Extrêmement improbable

0–1 % Exceptionnellement improbable

138 GT1. Document en français contenant le RID, le Résumé technique et la Foire aux questions. Pages 35 et 36.

139 Les comités de rédaction sont constitués d'auteurs principaux et d'auteurs coordinateurs du rapport, lesquels sont des scientifiques experts nommés par le bureau du GIEC.

II.2.4.3 - Précisions données dans le rapport complet du GT1

Tout d'abord le Chapitre 1, *Treatment of Uncertainties*, donne une présentation des deux critères, qualitatif et quantitatif¹⁴⁰, qui est la même que celle donnée par le RID et reproduite ci-dessus.

Puis, concernant plus précisément notre thèse, le chapitre 12, intitulé *Long-term Climate Change: Projections, Commitments, and Irreversibility*, c'est à dire le chapitre dans lequel sont traités les scénarios pour le XXI^e siècle, précise :

- « *Les ensembles tels que CMIP5 ne représentent pas une famille de modèles échantillonnés de manière systématique, mais reposent sur une auto-sélection par les groupes de modélisation. Ces ensembles ne sont donc pas conçus pour explorer l'incertitude de manière coordonnée, et la gamme de leurs résultats ne peut pas être directement interprétée comme une gamme exhaustive de résultats plausibles.* »¹⁴¹. (VOA¹⁴²).

- « *Il est impossible de déduire un niveau de confiance ou une probabilité à partir de la seule concordance des modèles ou de l'écart entre ceux-ci, sans tenir compte de la cohérence avec les observations, de la dépendance des modèles et enfin du degré de compréhension des processus pertinents et de leur prise en compte dans les modèles.* »¹⁴³ (VOA¹⁴⁴)

140 For AR5, the three IPCC Working Groups use two metrics to communicate the degree of certainty in key findings:

(1) Confidence is a qualitative measure of the validity of a finding, based on the type, amount, quality and consistency of evidence (e.g., data, mechanistic understanding, theory, models, expert judgment) and the degree of agreement ;

(2) Likelihood provides a quantified measure of uncertainty in a finding expressed probabilistically (e.g., based on statistical analysis of observations or model results, or both, and expert judgement) ».

141 Section 12.2.3 - From Ensembles to Uncertainty Quantification. Page 1040.

142 « *Ensembles like CMIP5 do not represent a systematically sampled family of models but rely on self-selection by the modelling groups. These ensembles are therefore not designed to explore uncertainty in a coordinated manner, and the range of their results cannot be straightforwardly interpreted as an exhaustive range of plausible outcomes* ».

« En résumé, il n'existe pas à l'heure actuelle de méthodologie formelle unique, solide et acceptée pour fournir des estimations quantifiées de l'incertitude des changements futurs, et cela quel que soient les variables climatiques. Par conséquent, dans ce chapitre, les énoncés utilisant le langage d'incertitude calibré sont le résultat du jugement expert des auteurs »¹⁴⁵ (VOA¹⁴⁶).

Ainsi les incertitudes des projections du GIEC portant sur le futur du changement climatique ne sont pas présentées avec des probabilités objectives mais subjectives, « qui dépendent des points de vue, sentiments ou convictions » des experts (Callon M., 2001).

II.2.4.4 - Sensibilité climatique et regard porté sur l'improbable

Selon le RID de la contribution du GT1 au 5^e RE¹⁴⁷ : « La sensibilité climatique à l'équilibre (...) est définie comme le changement de la température moyenne du globe en surface sous l'effet d'un doublement de la concentration du CO₂ atmosphérique, lorsque l'équilibre est atteint. Il est probable que la sensibilité climatique à l'équilibre se situe entre 1,5 et 4,5 °C (degré de confiance élevé), extrêmement improbable que celle-ci soit inférieure à 1 °C (degré de confiance élevé) et **très improbable que celle-ci soit supérieure à 6 °C (degré de confiance moyen)**. ». Ce propos trouve son importance dans le fait que « probable » signifie une probabilité située entre 64 % et 100 %, très improbable une probabilité située entre 0 % et 10 % et extrêmement improbable une probabilité située entre 0 % et 5 %. Vu les conséquences d'une élévation de température de plus de 6°C, l'éventualité « très improbable » de cette dernière peut

143 Box 12.1. Page 1043.

144 « *It is impossible to derive a confidence or likelihood statement from the model agreement or model spread alone, without considering consistency with observations, model dependence and the degree to which the relevant processes are understood and reflected in the models* ».

145 Page 1040.

146 « *In summary, there does not exist at present a single agreed on and robust formal methodology to deliver uncertainty quantification estimates of future changes in all climate variables. As a consequence, in this chapter, statements using the calibrated uncertainty language are a result of the expert judgement of the authors.* ».

147 p.16, section D.2.

sembler ne pas devoir être évacuée, mais, au contraire, devoir être prise en considération dans les stratégies politiques. Finalement, face à l'hypothèse d'un doublement de la concentration du CO₂ atmosphérique, la traduction et l'utilité politiques principales de la modélisation ne seraient-elles pas, non pas la connaissance d'un avenir probable où le réchauffement serait situé entre 1,5°C et 4,5°C, mais bien plutôt la connaissance du risque, pouvant atteindre une chance sur dix, que le réchauffement dépasse 6°C ?

Le lecteur pourra se demander pourquoi l'incertitude sur la sensibilité climatique ou plus précisément sur la sensibilité climatique au dioxyde de carbone est aussi grande ? C'est-à-dire pourquoi existe-t-il une telle incertitude sur la réponse du climat à un doublement de la concentration de CO₂ par rapport au début de l'ère industrielle ? La réponse se situe au niveau de la complexité du système climatique. Pour estimer cette sensibilité, le bilan radiatif (i.e. le surplus d'effet de serre) du CO₂ ne suffit pas. En effet, « *la sensibilité du climat dépend des différentes rétroactions qui vont se mettre en place dans les modèles de climat pour amplifier l'impact du surplus de GES : effets de la vapeur d'eau, des propriétés réfléchissantes des sols, des nuages* » (Masson-Delmotte, 2011, p.85).

Nous notons, enfin, que la sensibilité climatique au dioxyde de carbone est indépendante des puits et sources de dioxyde de carbone, puisque ces derniers agissent en amont de la concentration de ce GES.

II.2.4.5 – Les nuages, principale source d'incertitude des scénarios ? Oui mais...

L'étude des conséquences sur le climat des évolutions du système nuageux consécutives à un réchauffement climatique (rétroactions) présente des difficultés¹⁴⁸ qui demeurent largement à surmonter. Plus largement, paraphrasant L. Touzé-Peiffer (2018, p.103), il s'avère que « *Les phénomènes relatifs au cycle de l'eau sont, aujourd'hui encore, difficiles à modéliser* ».

148 Voir, pour une présentation limpide et détaillée de la nature et de la complexité de la question, le site de la NASA, *CloudSat-CALIPSO Launch*. Octobre 2005.

https://www.nasa.gov/sites/default/files/133608main_cloudsat-calipso-launch.pdf

Le système nuageux constitue la principale source d'incertitude prise en compte dans la construction des incertitudes associées aux projections climatiques publiés par le GIEC. A ce sujet, voici deux citations :

- « ... *l'un des plus grands défis de la climatologie : la dynamique des nuages et leur influence sur le climat. Les nuages constituaient en effet à l'époque (vers 2006) la principale source d'incertitude dans les modèles climatiques – cela demeure vrai aujourd'hui, même si des progrès ont été faits depuis – et étaient la cause principale des différences obtenues d'un modèle à l'autre.* » (Touzé-Peiffer, 2018, p.121).

- « *On sait que les nuages modulent fortement le rayonnement solaire absorbé par la Terre mais aussi l'effet de serre. Il y a des divergences entre modèles sur l'évolution de la couverture nuageuse avec le réchauffement induit par l'effet de serre. C'est la principale source d'incertitude dans les projections climatiques et c'est ce qui explique la dispersion des résultats donnés par les modèles de climat dans le cadre des travaux du GIEC.* » (Bréon, 2019, p.44).

Toutefois, afin d'être complet, nous notons que si le système nuageux constitue la principale source d'incertitude prise en considération par les modèles et les projections climatiques portant sur le XXI^e siècle, dans le même temps d'autres phénomènes sources d'incertitudes importantes ne sont pas pris en considération par ces modèles et projections, car ces derniers ne prennent en compte que « *toutes les incertitudes quantifiables connues* »¹⁴⁹. Dans le chapitre III.2, nous étudierons certains de ces phénomènes, en particulier quatre sources naturelles de méthane. Enfin, le passage ci-après du Résumé technique de la contribution du GT1 au 5^e RE présente quelques-uns de ces phénomènes, autres que ceux que nous étudierons : « *Toutefois, de nombreux processus n'étant pas encore représentés dans les modèles couplés climat-biogéochimie (comme les processus faisant intervenir d'autres éléments biogéniques tels que le phosphore, le silicium et le fer), leur importance doit être évaluée par des modèles débranchés ou plus simples, ce qui en rend difficile l'évaluation quantitative. Il est probable que des interactions non linéaires vont se produire entre nombre de ces processus, mais celles-ci ne sont pas encore bien quantifiées. C'est pourquoi toute évaluation des rétroactions qui vont se produire entre le climat et les cycles biogéochimiques reste largement incertaine.* »¹⁵⁰

149 Rapport intégral, GT1, 5^e RE, section 11.3.6, p.1004.

150 RT, GT1, 5^e RE. AT.7, p.97.

II.2.4.6 – Conclusion

Les incertitudes sur les scénarios climatiques communiquées par le GIEC ont été minimisées puisque, notamment, l'ensemble des phénomènes du *Reste causal* associé à ces scénarios n'ont pas été pris en considération dans les calculs ou estimations de ces incertitudes ; bien que ces phénomènes et leur combinaison génèrent une forte incertitude sur ces scénarios. Selon Hulme et Mahony, « *La recherche d'un consensus au sein du GIEC a été largement motivée par le désir de communiquer de manière cohérente la science du climat à un large éventail d'utilisateurs politiques, mais ce faisant, la communication des incertitudes a été minimisée* ». (Hulme et Mahony, 2010,p.10) (VOA¹⁵¹). Selon Kari De Pryck (2022, p.94), « *De nombreux chercheurs reprochent au GIEC de privilégier les conclusions qui font consensus et celles pour lesquelles les incertitudes peuvent être chiffrées au détriment d'une présentation de la pluralité des types d'incertitudes et jugements d'experts. En effet, il existe un risque que les conclusions qui font l'objet de désaccord et dont Il est difficile de mesurer le degré de certitude soient écartées du processus d'évaluation malgré leur importance.* »

Pour finir, nous reprenons un extrait d'un article de Stephan Lewandowsky et al. (2015, p.9), où nous voyons que minimiser l'incertitude, c'est, 'pratiquement toujours', édulcorer le risque et réduire l'inquiétude : « *Nous avons montré précédemment que si l'incertitude scientifique sur l'évolution du système climatique est plus grande qu'on ne le pense, cela implique pratiquement toujours que les conséquences négatives potentielles sont également plus grandes. Par exemple, les propriétés statistiques des valeurs extrêmes imposent qu'une incertitude croissante sur l'ampleur de l'élévation future du niveau de la mer nécessite des mesures de protection de plus en plus importantes si l'on veut maintenir constant le risque d'inondation. Il s'ensuit que tout appel à l'incertitude scientifique devrait susciter une inquiétude plus forte, et non plus faible, à l'égard d'un réchauffement continu qu'en l'absence d'incertitude.* ». (VOA¹⁵²).

151 « *Consensus-making in the IPCC has been largely driven by the desire to communicate climate science coherently to a wide spectrum of policy users – 'to construct knowledge' (Weingart, 1999) - but in so doing communicating uncertainties have been down-played* ».

Chapitre 3 - Une contribution politique historique

« La COP21 suscita, par la signature historique des accords de Paris d’immenses espoirs, aujourd’hui largement retombés. Tous les yeux s’étaient tournés vers le haut, espérant enfin des mesures, des réponses fortes, à l’aune des engagements pris. Prenant acte des désillusions éprouvées depuis (...), un autre espoir, non plus celui qui viendrait d’en haut, mais celui que nous pouvons porter, tous et chacun. Nous les héros d’aujourd’hui »¹⁵³.

Ce propos de Laure Pipien Yout, professeure agrégée de Lettre Moderne, certifiée d’Histoire de l’art, est quelque peu emphatique à propos de l’espoir suscité à fin de l’année 2015 par les conclusions de la COP21. Aussi et surtout, il illustre la présence, dans l’espace public et médiatique, d’une image des gouvernements nationaux et des politiques internationales, marquée du sceau de la passivité et de ‘l’inaction climatique’ ; image qui, cependant, coexiste avec d’autres images, dont celle véhiculée par des climato-sceptiques. Ceux-ci, au contraire, accuse les responsables politiques d’une mobilisation excessive et sans fondement. Qu’en est-il dans les faits ?

Nous avons vu, chapitre I.1, que le Protocole de Kyoto (1997), première étape de la mobilisation politique internationale effective, avait été tout à la fois historiquement important et nettement insuffisant pour répondre à la nécessité d’atténuer le changement climatique. Qu’en est-il à la suite de la COP21 ?

152 « *We have shown earlier that if scientific uncertainty about the evolution of the climate system is greater than thought, this virtually always implies that the potential adverse consequences are also greater. For example, the statistical properties of extreme values mandate that increasing uncertainty about the extent of future sea level rise requires increasingly greater protective measures if the risk of inundation is to be kept constant (Hunter, 2012). It follows that any appeal to scientific uncertainty should compel a stronger, rather than weaker, concern about unabated warming than in the absence of uncertainty.* ».

153 Extrait de la préface signée Laure Pipien Yout, juin 2021, de l’ouvrage *Climate Heroes*, de Maxime Riché, édité chez Hemeria.

Préalablement, nous allons observer l'apport du GIEC à la dynamique qui a mené à l'Accord de Paris, ainsi que la mobilisation politique effective depuis les années 1990.

II.3.1 - Appropriation politique de la preuve scientifique

Depuis 1990, date du premier Rapport d'évaluation (RE) du GIEC, les Résumés à l'intention des décideurs (RID) des rapports successifs confortent progressivement l'hypothèse selon laquelle un changement climatique d'origine anthropique ou essentiellement anthropique est déjà en cours. Nous verrons que dès 1990 se présenta une forme de dualité, entre l'affirmation de la certitude ou quasi-certitude que nous allions vers un réchauffement climatique d'origine anthropique, d'une part, et, d'autre part, la recherche d'une preuve par les modèles que ce réchauffement était déjà amorcé.

II.3.1.1 - 1^{er} RE, 1990

Selon le RID du GT1 du 1^{er} RE : *« Nous avons la certitude que les émissions dues aux activités humaines accroissent sensiblement la concentration dans l'atmosphère des gaz à effet de serre : dioxyde de carbone, méthane, chlorofluorocarbones (CFC) et oxyde nitreux. Cette augmentation renforcera l'effet de serre, intensifiant le réchauffement général de la surface terrestre. Le principal gaz à effet de serre, c'est-à-dire la vapeur d'eau, deviendra plus abondante sous l'effet du réchauffement planétaire ce qui accentuera encore ce dernier. »*¹⁵⁴

Ainsi, dès ce premier Rapport d'évaluation, le RID du GT1 était sans ambiguïté ni nuance à propos de l'existence présente d'une augmentation sensible d'origine anthropique des taux de GES dans l'atmosphère. Il était tout aussi clair et sans nuance à propos de l'existence future d'un réchauffement climatique planétaire consécutif à cette augmentation.

Plus loin le texte de ce RID porte sur l'évaluation d'un réchauffement déjà effectif. Nous y trouvons un propos bien moins affirmatif :

« Nous estimons que :

¹⁵⁴ Section 1.

- *La température globale moyenne de l'air en surface a augmenté de 0,3 à 0,6 °C au cours des 100 dernières années.*
- *La valeur de ce réchauffement concorde dans l'ensemble avec les prévisions fondées sur les modèles du climat, mais elle est aussi du même ordre de grandeur que la variabilité naturelle du climat. Par conséquent, l'augmentation observée pourrait être due en grande partie à cette variabilité naturelle ; d'un autre côté, cette variabilité et d'autres facteurs humains pourraient avoir contrebalancé un réchauffement encore plus considérable dû à un effet de serre anthropique. Il se passera probablement au moins 10 ans avant que des observations nous permettent d'établir de façon certaine qu'il y a eu renforcement de l'effet de serre »¹⁵⁵.*

Ce RID ne présentait donc pas de position portant sur l'expression ou non d'un réchauffement dès 1990. Par ailleurs, il annonçait le recours à la modélisation pour trancher et conclure cette question, ce à quoi il associait une échéance « probable », « au moins dix ans », soit au plus tôt au tournant du XXI^e siècle, échéance qui se situait dans la continuité des travaux de Plass et Revelle (fin des années 1950) et du rapport Wigley et Jones (1981). Enfin, l'avant dernière phrase de cet extrait comportait une alerte sur l'éventualité d'un réchauffement « encore plus considérable dû à un effet de serre anthropique » caché par la variabilité naturelle du climat ou encore par l'expression de phénomènes d'origine humaine autres que l'augmentation des taux de GES.

II.3.1.2 - 2^e RE, 1995

Cinq ans plus tard, le RID de la contribution du GT1 du 2^e RE affirma, dans la continuité du 1^{er} RE, l'existence d'une augmentation des taux de GES d'origine anthropique. Mais, alors que le RID de la contribution du GT1 du 1^{er} RE ne suggérait pas d'origines non anthropiques s'ajoutant à l'origine anthropique, cette fois ci le GIEC précisait que l'augmentation des taux de GES était largement, et donc pas totalement, due à l'activité humaine ; ce qui, par rapport au 1^{er} RE, pouvait sembler marquer un recul, mais un recul qui, nous le verrons, ne perdurera pas.

155 Section 4.1.2.1.8.2 - 2e RE, 1995

La traduction de cette augmentation des taux de GES en un réchauffement climatique n'était pas affirmée avec la même clarté que dans le RID du 1^{er} RE, mais donnait lieu à l'utilisation de l'expression un peu floue « tend à réchauffer ».

Quant à la « tendance au réchauffement » observée, le fait que l'activité humaine en soit l'une des causes est donné comme probable, alors que cinq ans auparavant l'incertitude en ce domaine était exprimée, mais aucune probabilité ne lui était associée.

Extraits du RID du GT1 :

- « *Un accroissement notable de la teneur atmosphérique des gaz à effet de serre a été observé (...). Cette évolution est largement imputable aux activités humaines (...).* »¹⁵⁶

« *L'augmentation de la concentration de gaz à effet de serre depuis l'époque préindustrielle (c'est-à-dire depuis 1750 environ) a conduit à un forçage radiatif du climat qui tend à réchauffer la surface du globe et à produire d'autres changements climatiques* ». ¹⁵⁷

- « *un faisceau d'éléments suggère qu'il y a une influence perceptible de l'homme sur le climat global* ». « (...) *la tendance au réchauffement observée n'est probablement pas uniquement d'origine naturelle.* ».¹⁵⁸

II.3.1.3 - 3^e RE¹⁵⁹, 2001

Six ans plus tard, en 2001, le RID de la contribution du GT1 au 3^e RE affirmait que les taux de GES augmentaient dans l'atmosphère à cause des activités humaines. Ainsi, cette augmentation était entièrement imputée aux activités humaines ; le « recul » du RID du 2^e RE était abandonné. Une même clarté s'exprimait à propos de l'existence d'un réchauffement climatique durant les 50 dernières années.

156 Partie 1.

157 Partie 1.

158 Partie 4.

159 Voir <https://archive.ipcc.ch/ipccreports/tar/vol4/french/pdf/wg1sum.pdf>

Quant au lien de causalité entre les activités humaines et le réchauffement observé, le GIEC affirmait cette fois-ci qu'il était probable que l'essentiel du réchauffement était d'origine humaine ; ce qui, dans le langage de ce RID, exprimait une probabilité située entre 66 % et 90%. Dans le RE précédent, le même niveau de probabilité était exprimé, mais pour l'hypothèse « pas uniquement d'origine naturelle », ce qui signifiait simplement que l'activité humaine était l'une des causes. Cette fois-ci l'hypothèse est que la cause essentielle est anthropique : un autre pas est donc ainsi franchi.

Extraits du RID du GT1 :

- « *Les concentrations atmosphériques de gaz à effet de serre et leur forçage radiatif ont continué d'augmenter à cause des activités humaines.* »¹⁶⁰

- « *Compte tenu des nouveaux éléments de preuve obtenus et des incertitudes qui subsistent encore, l'essentiel du réchauffement observé ces 50 dernières années est probablement dû à l'augmentation des concentrations de gaz à effet de serre.* »¹⁶¹

II.3.1.4 - 4^e RE¹⁶², 2007

Six ans plus tard, en 2007, le RID de la contribution du GT1 au 4^e RE marqua une étape importante. D'une part, il y avait la reconnaissance d'une « forte » augmentation des taux de GES dans l'atmosphère en conséquence des activités humaines. D'autre part, un haut niveau de probabilité était accordé à l'hypothèse de la cause anthropique de l'essentiel du changement climatique, plus exactement une probabilité située entre 90 % et 100 %, et non plus entre 66 % et 90 %. Un pas important était dès lors franchi vers la reconnaissance politique pleine et entière d'un réchauffement d'origine anthropique. Voici les termes utilisés par le GIEC :

- « *Les concentrations atmosphériques mondiales de dioxyde de carbone, de méthane et d'oxyde nitreux ont fortement augmenté en conséquence des activités humaines entreprises de-*

160 P.6.

161 P.12.

162 https://archive.ipcc.ch/publications_and_data/ar4/wg1/fr/spm.html

puis 1750, et dépassent aujourd'hui largement les valeurs préindustrielles déterminées à partir des carottes de glace couvrant plusieurs milliers d'années. »¹⁶³ ;

- « C'est avec un degré de très haute confiance que l'on peut affirmer que l'effet global moyen net des activités humaines depuis 1750 a été le réchauffement, avec un forçage radiatif¹⁶⁴ de +1,6 [de +0,6 à +2,4] $W m^{-2}$ »¹⁶⁵. ».

- « L'essentiel de l'accroissement observé sur la température moyenne globale depuis le milieu du XX^e siècle est très probablement dû à l'augmentation observée des concentrations des gaz à effet de serre anthropiques. »¹⁶⁶. Pour rappel, dans le langage du GIEC « très probablement » signifie une probabilité supérieure ou égale à 90 %.

Enfin, le pas franchi vers la reconnaissance absolue de la cause anthropique du réchauffement observé reposait sur la modélisation. Cela était exprimé dans ce RID dans les termes suivants : « Les structures observées du réchauffement, y compris un réchauffement plus important sur les continents que sur les océans, et leurs variations dans le temps, ne sont simulées que par des modèles qui tiennent compte du forçage anthropique. La capacité des modèles climatiques couplés à simuler l'évolution observée des températures dans chacun des six continents permet d'obtenir des preuves plus sûres de l'influence humaine sur le climat que celles disponibles dans le troisième Rapport. »¹⁶⁷

163 Voir le chapitre *Facteurs humains et naturels des changements climatiques*.

164 Le GIEC précise en note de bas de page de ce chapitre : « Le forçage radiatif est une mesure de l'influence d'un facteur dans la modification de l'équilibre entre l'énergie qui entre dans l'atmosphère terrestre et celle qui en sort, et constitue un indice de l'importance de ce facteur en tant que mécanisme potentiel du changement climatique. Un forçage positif tend à réchauffer la surface et un forçage négatif à la refroidir. Dans le présent Rapport, les valeurs du forçage radiatif sont données pour l'année 2005 par rapport aux conditions préindustrielles définies comme celles de 1750 et sont exprimées en watt par mètre carré (Wm^{-2}). »

165 Voir le chapitre *Facteurs humains et naturels des changements climatiques*.

166 Voir le Chapitre *Comprendre le changement climatique et en attribuer les causes*.

167 Voir le Chapitre *Comprendre le changement climatique et en attribuer les causes*, p.10.

II.3.1.5 - 5^e RE, 2013

En 2013, le RID de la contribution du Groupe 1 au 5^e RE affirma que l'influence de l'activité humaine sur le climat était déjà visible, et que l'hypothèse selon laquelle cette influence était la cause *principale* (le 4^e RE employait le terme *essentielle*) du réchauffement observé était extrêmement probable, ce qui, dans le langage du GIEC, signifiait une probabilité d'au moins 95 %. Ce 5^e RE franchit ainsi la ligne d'arrivée d'un processus de plus de 20 ans de construction d'un consensus politique et scientifique reconnaissant que l'activité humaine avait commencé à réchauffer le climat.

Voici deux extraits de ce RID :

- « *l'influence de l'homme sur le système climatique est clairement établie, et ce, sur la base des données concernant l'augmentation des concentrations de gaz à effet de serre dans l'atmosphère, le forçage radiatif positif, le réchauffement observé et la compréhension du système climatique.* »¹⁶⁸.

- « *On détecte l'influence des activités humaines dans le réchauffement de l'atmosphère et de l'océan, dans les changements du cycle global de l'eau, dans le recul des neiges et des glaces, dans l'élévation du niveau moyen mondial des mers et dans la modification de certains extrêmes climatiques (voir figure RID.6 et tableau RID.1). On a gagné en certitude à ce sujet depuis le quatrième Rapport d'évaluation. Il est extrêmement probable que l'influence de l'homme est la cause principale du réchauffement observé depuis le milieu du XX^e siècle.* »¹⁶⁹.

Enfin, pour conclure cette section consacrée à l'appropriation politique de la preuve scientifique, nous rappelons que ce Résumé à l'intention des décideurs (RID) a été rédigé par des scientifiques du groupe 1 du GIEC, puis adopté par l'ensemble des représentants des gouvernements des 195 États membres de l'organisation, après échanges et accords sur des amendements entre scientifiques et politiques. Ainsi, cette position claire et sans ambiguïté du GIEC, exprimée dans un document destiné à une large communication, constitue une appropriation politique d'un acquis scientifique.

168 Chapitre D., p. 15.

169 Section D.3., p.17.

II.3.2 – La preuve par les modèles

Ce résultat, cette reconnaissance tout à la fois scientifique et politique, repose sur la modélisation climatique. En effet, le réchauffement observé accumulé entre le milieu du XX^e siècle et le début du XXI^e siècle est incompatible avec les résultats de la modélisation dès lors que celle-ci ne prend pas en compte l'augmentation de la concentration de GES d'origine anthropique, alors qu'il est en adéquation avec ces résultats dès lors que cette augmentation de la concentration de GES est prise en compte. A l'opposé, jusqu'à peu avant la fin du XX^e siècle, le réchauffement cumulé se situait dans les plages d'incertitudes des résultats de la modélisation, même lorsque cette augmentation de la concentration de GES n'était pas prise en considération par les modèles. Nous avons donc un seuil, atteint vers le tournant du XXI^e siècle, à partir duquel le réchauffement cumulé observé permet d'obtenir une preuve par les modèles du changement climatique d'origine anthropique.

Ce seuil est présenté par Sylvain Mondon (2017, p. 30-31) : « *Le 4^e rapport d'évaluation du GIEC publié en 2007 a constitué une avancée importante, mais surtout le 5^e rapport d'évaluation publié en 2013 (volume 1) et 2014 (synthèse, volumes 2 et 3) puisque désormais les modèles climatiques ne parviennent plus à reproduire l'évolution du climat observée depuis la fin du XX^e siècle sans prendre en compte les émissions anthropiques de GES directes (ex. combustion du charbon et du pétrole) et indirectes (ex. déforestation) même en tenant compte de la plage d'incertitude des simulations. Autrement dit, pour reproduire fidèlement les observations du climat du passé récent avec ces modèles, il est nécessaire d'inclure les émissions de GES anthropogéniques* ».

Dès 2011, Valérie Masson-Delmotte décrivait cet événement scientifique historique : « *Pour évaluer la part du réchauffement récent due au surplus d'effet de serre, ces modèles (les modèles climatiques) sont utilisés pour simuler l'évolution du climat (...). On leur impose ensuite soit l'évolution des facteurs naturels (activité solaire, volcanisme), soit l'évolution des facteurs anthropiques (effet de serre, aérosols, usage des sols), soit l'ensemble des facteurs combinés. (...). Ces simulations montrent systématiquement que (...) le réchauffement observé depuis 1950*

à l'échelle globale ne peut être expliqué que par le surplus de GES. Il est même probable que certains facteurs naturels (volcanisme, relativement fréquent, minimum solaire prolongé) et anthropiques (particules de pollution) ont atténué l'effet des rejets de GES. A partir de ces éléments, le GIEC a pris position dans son 4^e rapport de synthèse, en 2007, pour affirmer que la majeure partie du réchauffement de la seconde moitié du XX^e siècle est très vraisemblablement due au surplus d'effet de serre et donc aux activités humaines. » (Masson-Delmotte, 2011, p.72-73).

II.3.3 - De la pleine reconnaissance scientifique à la pleine mobilisation politique ?

La reconnaissance scientifique et politique d'un réchauffement climatique d'origine humaine par le 5^e RE du GIEC (2013) précéda de deux années la 21^e Assemblée plénière de la CCNUCC, communément appelée COP21, qui s'est conclue par l'Accord de Paris (2015). Kari De Pryck (2022, p.132) rapporte que « *selon Rajendra Pachauri (Président du GIEC durant les cycles des 4^e et 5^e RE), le 5^e RE doit servir de feuille de route pour les diplomates engagés dans la négociation d'un nouvel accord sur le climat* » ; ce qui illustre la mission générale du GIEC de contribuer à la mobilisation politique internationale, ainsi que l'apport particulier du 5^e RE à l'Accord de Paris qui opéra un tournant et franchit une étape majeure de la mobilisation politique internationale face au changement climatique. Il est par ailleurs à noter que l'Accord de Paris adressa une demande¹⁷⁰ au GIEC qui s'est traduite par le Rapport spécial sur un réchauffement planétaire de 1,5°C (2018), lequel fut suivi d'une vague d'adoptions par des États et d'une adoption par le G7¹⁷¹ de l'objectif de neutralité carbone vers 2050.

170 Voir le RID, page 51, du Rapport spécial :

https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/sites/2/2019/09/SR15_Summary_Volume_french.pdf

171 <https://www.consilium.europa.eu/media/50361/carbis-bay-g7-summit-communique.pdf>

II.3.3.1 – Bilan de la mobilisation politique concrète

Au milieu des années 2010, trente cinq années s'étaient écoulées depuis le rapport Charney publié en 1979. Trente cinq années durant lesquelles les enjeux climatiques n'avaient cessé de croître. Trente cinq années où, nous l'avons vu au sous-chapitre I.1.7, les actions politiques et les transformations opérées, bien que non négligeables, n'étaient pas à la hauteur de ce qui était nécessaire pour écarter le risque de conséquences majeures et irréversibles du réchauffement climatique ; malgré le Protocole de Kyoto (1995) et l'amendement de Doha qui le prolongea (2012).

Dans sa contribution au 6^e RE (2021), le GT1 du GIEC éclaire l'insuffisance des actions concrètes qui visent à atténuer le changement climatique, en faisant le point sur les évolutions depuis 1990 des émissions mondiales de dioxyde de carbone issues des énergies fossiles. Tout au plus, l'humanité est-elle parvenue à ralentir l'accroissement de ces émissions : *« Les émissions de CO₂ d'origine fossile ont augmenté de 0,9 % par an dans les années 1990, puis de 3 % par an dans les années 2000, avant d'être ramenées à 1,2 % entre 2010 et 2019. Le ralentissement de la croissance des émissions de CO₂ d'origine fossile au cours de la dernière décennie est dû à un ralentissement de la croissance de l'utilisation du charbon. Les émissions de CO₂ provenant de l'utilisation du charbon ont augmenté de 4,8 % par an au cours des années 2000, mais elles ont ralenti à 0,4 % par an au cours des années 2010. Les émissions de CO₂ provenant de l'utilisation du pétrole ont augmenté régulièrement de 1,1 % par an au cours des années 2000 et 2010. Les émissions de CO₂ provenant de l'utilisation du gaz ont augmenté de 2,5 % par an dans les années 2000 et de 2,4 % par an dans les années 2010, mais elles montrent des signes de croissance accélérée de 3 % par an depuis 2015. »*¹⁷² (VOA¹⁷³).

Toutefois, l'humanité a évité le scénario *Business-as-Usual* publié en 1990 dans le 1^{er} Rapport d'évaluation du GIEC. Ce scénario projetait pour 2025 un doublement du taux de CO₂ dans l'at-

172 6^e RE, GT1, version adoptée mais édition non finalisée, section 5.2.1.1, page 5-19.

173 « Fossil CO₂ emissions grew at 0.9% yr⁻¹ in the 1990s, increasing to 3.0% per year in the 2000s, and reduced to 1.2% from 2010 to 2019. The slower growth in fossil CO₂ emissions in the last decade is due to a slowdown in growth from coal use. CO₂ emissions from coal use grew at 4.8% yr⁻¹ in the 2000s, but they slowed to 0.4% yr⁻¹ in the 2010s. CO₂ emissions from oil use grew steadily at 1.1% yr⁻¹ in both the 2000s and 2010s. CO₂ emissions from gas use grew at 2.5% yr⁻¹ in the 2000s and 2.4% yr⁻¹ in 2010s, but is showing signs of accelerated growth of 3% yr⁻¹ since 2015. »

mosphère par rapport à la période préindustrielle, soit 560ppm¹⁷⁴. Ce taux était de 355ppm en 1990¹⁷⁵, si bien que selon ce scénario un bond de 205ppm aurait dû être réalisé en 35 ans. Or aujourd'hui, seulement trois années nous séparent de 2025, et nous savons que ce taux se situera alors aux environs de 430ppm ; l'accroissement effectif aura donc été de 75ppm en 35 ans, et non pas de 205ppm. Bien sûr, le chiffre de 560ppm et corrélativement celui de 205ppm sont à considérer avec précaution : publié en 1990, il portait sur l'horizon à 35 ans d'un univers hyper complexe et fortement imprévisible.

Ainsi, si nous constatons l'existence d'une boucle de rétroactions climatiques négatives issue de la volonté humaine, jusqu'à ce jour cette dernière reste bien trop faible et se traduit uniquement par un ralentissement de la croissance des émissions anthropiques de GES. Toutefois, nous n'allons pas, contrairement à Laure Pipien Yout, hâtivement *prendre acte des désillusions éprouvées* à l'égard des responsables politiques depuis la COP21 (ni, à l'opposé, considérer que la résolution du problème climatique est clairement en bonne voie depuis la COP21). En effet, la mise en place des conditions de l'expression d'une rétroaction climatique (positive ou négative) se réalise bien souvent sur une période qui précède cette expression (constat que nous retrouverons à propos des rétroactions positives de sources naturelles de méthane dans le chapitre III.2), si bien qu'un délai peut séparer le lancement d'une politique climatique de ses premiers impacts concrets majeurs sur la concentration des GES.

Avant d'observer le chemin parcouru au plan politique depuis l'Accord de Paris, nous reproduisons un propos de V. Masson-Delmotte, sur le contexte de 2022 : « *Comme on a déjà des politiques publiques qui sont mises en place, comme on a aussi des progrès technologiques, par exemple pour faire de l'électricité bas carbone à un prix compétitif ou bien pour substituer des déplacements électrifiés à des véhicules thermiques, des scénarios de fortes ou très fortes émissions de GES, d'utilisation en particulier très fortes et croissantes de charbon, sont jugés aujourd'hui comme moins plausibles qu'il y a une dizaine ou une quinzaine d'années* »¹⁷⁶

174 *The IPCC Overview of the IPCC First Assessment Report, Appendix, Emissions scenarios developed by IPCC.* 1992. Page 61.

175 Voir le 5^e RE du GIEC.

176 <https://www.youtube.com/watch?v=ZkwaYw8RMzk&t=4445s> (à partir de 47 mn).

II.3.3.2 - Décembre 2015. L'Accord de Paris

Le 11 novembre 2014, un accord sur le climat entre les États-Unis et la Chine marqua un tournant. Pour la première fois, la Chine s'engageait derrière un objectif chiffré, atteindre son pic d'émission de GES au plus tard en 2030. Quant aux États-Unis, qui n'avaient pas ratifié le Protocole de Kyoto, ils s'engageaient à atteindre en 2025 une réduction de leurs émissions située entre 25 % et 28 % par rapport à 2005. Cet accord ouvrait une dynamique vers la COP21, qui allait se tenir à Paris du 30 novembre au 15 décembre 2015. Entre temps, les 197 parties (pays) membres de la CCNUCC étaient appelées à déposer des engagements de réduction des émissions (ou d'atténuation de l'augmentation) à l'horizon 2025-2030. Chaque pays était libre dans la définition de ses engagements. La méthode de mobilisation internationale était innovante et marquait à bien des égards une rupture avec le Protocole de Kyoto, notamment était abandonnée la définition par le haut (par un accord international) des objectifs de réduction de chaque nation ou d'une partie d'entre elles.

Ce changement majeur pouvait sembler réaliste et prometteur dans le contexte créé par la dynamique scientifique et politique du GIEC. En effet, cette dynamique avait débouché, en 2013, sur l'adoption du RID de la contribution du GT1 au 5^e RE qui, nous l'avons vu, affirmait pour la première fois que de façon extrêmement probable la cause principale du réchauffement climatique, dont l'existence était « sans équivoque »¹⁷⁷, était anthropique. Au sein du GIEC, un consensus politique s'était ainsi exprimé entre l'ensemble des gouvernements nationaux sur l'existence et la nature du problème climatique. Le travail des scientifiques, la diplomatie et les rapports de forces entre les nations avaient permis d'obtenir ce consensus. Cette même dynamique allait-elle, organisée et stimulée par l'Accord de Paris, déboucher sur une mobilisation mondiale apte à contenir le réchauffement climatique nettement sous 2°C, voire à ne pas dépasser 1,5°C, conformément aux termes de ce même Accord ?

En effet, le 12 décembre 2015, les États signataires de l'Accord de Paris avaient renforcé leur engagement collectif en termes d'objectif de limite du réchauffement en se donnant pour cadre de rester **nettement en dessous des 2°C** d'augmentation depuis le début de l'ère industrielle et de **poursuivre les efforts pour ne pas dépasser 1,5°C**. Lors de la COP 15, tenue à

¹⁷⁷ 5^e RE, GT1, RID, Chapitre B., p.4.

Copenhague en 2009, un premier engagement chiffré avait été pris, rester sous les 2°C¹⁷⁸. Depuis lors, ce chiffre était présent dans les déclarations des COP et dans les rapports du GIEC.

Par ailleurs, l'Accord de Paris avait donné au GIEC la mission de rédiger un Rapport spécial sur un réchauffement planétaire de 1,5°C. En 2018, le GIEC publia ce rapport qui répondait donc à une demande politique externe¹⁷⁹ au GIEC et venait combler un manque ; en effet, les scénarios les plus ambitieux du 5^e RE se traduisaient par un réchauffement limité à 2°C.

Extraits de l'Accord de Paris

- Article 2.1. : « *Le présent Accord, en contribuant à la mise en œuvre de la Convention (la CCNUCC), notamment de son objectif, vise à renforcer la riposte mondiale à la menace des changements climatiques, dans le contexte du développement durable et de la lutte contre la pauvreté, notamment en :*

a) Contenant l'élévation de la température moyenne de la planète nettement en dessous de 2 °C par rapport aux niveaux préindustriels et en poursuivant l'action menée pour limiter l'élévation de la température à 1,5 °C par rapport aux niveaux préindustriels, étant entendu que cela réduirait sensiblement les risques et les effets des changements climatiques. (...)».

- Proposition de la présidence de la COP21, section 21 : « *Invite le Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat à présenter un rapport spécial en 2018 sur les conséquences d'un réchauffement planétaire supérieur à 1,5 °C par rapport aux niveaux préindustriels et les profils connexes d'évolution des émissions mondiales de gaz à effet de serre* »¹⁸⁰.

178 Cet objectif est encore le cadre de référence de la COP20 de Lima, ce qu'illustre la déclaration léminaire de l'Union européenne, <https://unfccc.int/files/bodies/cop/application/pdf/eu.pdf>, en ces termes « *We would like to welcome the recent publication of the IPCC Synthesis Report and its findings. The report highlights the needs for collective and significant action to keep warming below 2 degrees C.* ».

179 « Externe » est un qualificatif un peu formel, car l'Assemblée plénière du GIEC et celle des COPs représentent les mêmes États, à quelques rares exceptions près.

180 <https://unfccc.int/resource/docs/2015/cop21/fre/l09f.pdf>

II.3.3.3 - Octobre 2018. Rapport spécial sur un réchauffement planétaire de 1,5°C

Le 8 octobre 2018, le GIEC publiait le *Rapport spécial sur les conséquences d'un réchauffement planétaire de 1,5 °C par rapport aux niveaux préindustriels et les trajectoires associées d'émissions mondiales de gaz à effet de serre dans le contexte du renforcement de la parade mondiale au changement climatique, du développement durable et de la lutte contre la pauvreté*. Les scénarios 1,5°C de ce rapport visent à ne pas dépasser, sauf éventuellement de façon temporaire, un réchauffement de 1,5°C depuis le début de l'ère industrielle, et dans tous les cas à se situer au maximum à 1,5°C à la fin du XXI^e siècle. Ils passent tous par la neutralité carbone (il s'agit ici des seules émissions de CO₂) vers 2050.

La publication de ce rapport s'accompagne d'une foire aux questions. L'une de ces dernières « *Pourquoi parle-t-on de 1,5°C ?* », permet au GIEC de rappeler que ce rapport répond à une demande politique de la COP21. « *Les changements climatiques représentent une menace immédiate et potentiellement irréversible pour les sociétés humaines et la planète. Devant ce constat, la quasi-totalité des pays ont adopté en décembre 2015 l'Accord de Paris qui vise notamment à poursuivre l'action engagée afin de limiter la hausse de la température planétaire à 1,5 °C. Ils ont également prié le GIEC, par l'entremise de la Convention-cadre des Nations Unies sur les changements climatiques (CCNUCC), de présenter un rapport spécial sur les conséquences d'un réchauffement planétaire de 1,5 °C par rapport aux niveaux préindustriels et les trajectoires associées d'émissions mondiales de gaz à effet de serre.* »¹⁸¹

Précédemment, le 5^e RE du GIEC (2013-2014) présentait des scénarios climatiques pour le XXI^e siècle qui se déclinaient selon 4 profils.

À une extrémité, nous avons le profil volontariste, pour lequel il est « *probable que le réchauffement sera maintenu durant le XXI^e siècle à moins de 2 °C par rapport aux niveaux préindus-*

181 Rapport spéciale sur un réchauffement de 1,5°C. Foire aux questions, FAQ 1.1, Pourquoi parle-t-on de 1,5 °C ? Page 51 du document

https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/sites/2/2019/09/SR15_Summary_Volume_french.pdf

triels », conformément à l'accord de la COP15, Copenhague 2009. Ce profil est « *caractérisé par une réduction mondiale de 40 à 70 % des émissions anthropiques de GES entre 2010 et 2050, et par des émissions presque nulles, voire des émissions négatives en 2100* »¹⁸². Nous notons qu'il s'agit ici et qu'il s'agira par la suite d'émissions nettes, bilan des sources anthropiques et des puits anthropiques de GES.

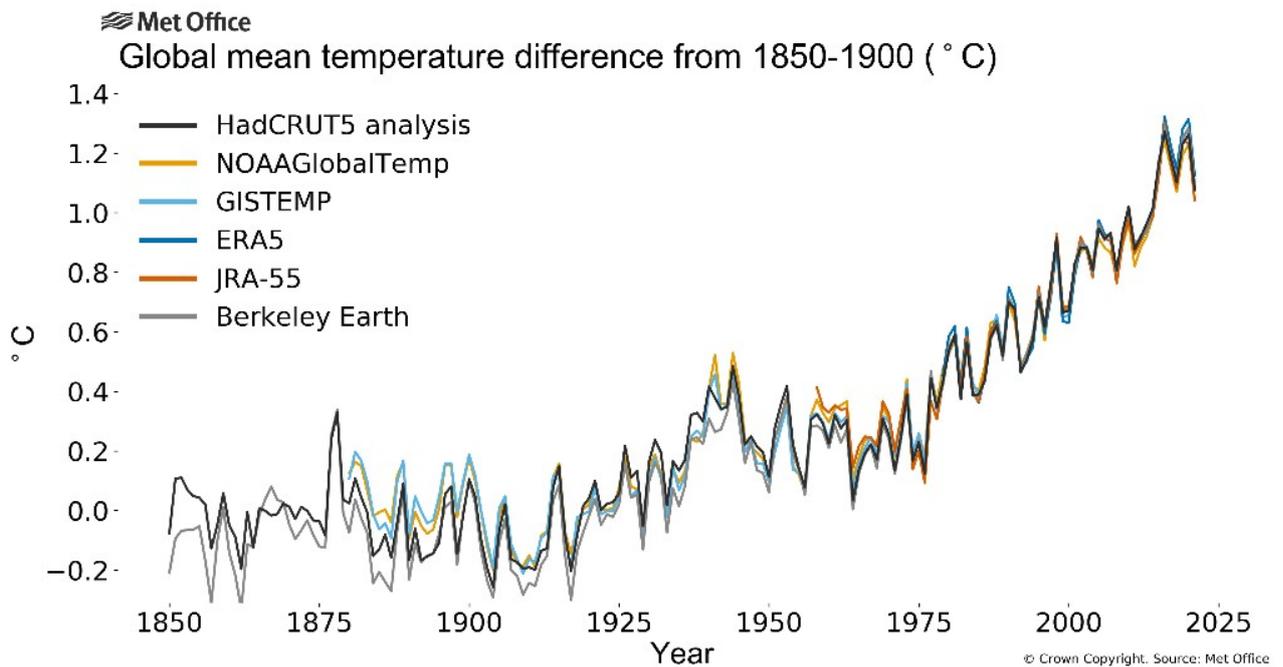
À l'autre extrémité, nous avons le profil passif, caractérisé par une absence d'effort d'atténuation supplémentaire, conduisant à des augmentations de la température en 2100 d'environ 3,7 à 4,8 °C par rapport à la période 1850–1900, « *pour une réponse médiane du climat* »¹⁸³.

Dans le Rapport spécial sur un réchauffement planétaire de 1,5°C, le profil volontariste a pour objectif de rester sous les 1,5°C (sauf ponctuellement) et passe par la neutralité carbone (au sens des émissions nettes de CO₂) aux environs de 2050. Le chemin parcouru en 4 ou 5 ans au niveau de la politique internationale est notable.

II.3.3.4 – De l'expression du changement climatique devenue visible et de la mobilisation citoyenne et politique

182 5^e RE, rapport de synthèse, RID, p. 21.

183 Op. Cit.



Courbe extraite du site de l'OMM¹⁸⁴ (la température de la dernière année, 2021, est la moyenne sur les 9 premiers mois, à savoir 2021 est une année d'expression de *La Niña*, phénomène qui donne lieu à un refroidissement ponctuel de l'atmosphère).

L'année 2014 a vu la température terrestre (la température moyenne mondiale de l'atmosphère proche de la surface de la Terre) établir un nouveau record, lequel fut à nouveau battu dès l'année suivante, en 2015, puis à nouveau en 2016, année d'une pleine expression du phénomène

184 Extrait du communiqué de presse de l'OMM publié le 31/11/2021 *État du climat en 2021: des phénomènes météorologiques extrêmes et de lourdes conséquences.*

<https://public.wmo.int/fr/medias/communiqu%C3%A9s-de-presse/%C3%A9tat-du-climat-en-2021-des-ph%C3%A9nom%C3%A8nes-m%C3%A9t%C3%A9orologiques-extr%C3%Aames-et-de> , vu le 18/11/2021.

El Niño, lequel occasionne un réchauffement momentané. À l'issue de ces trois années, le record avait fait un bond d'environ 0,3°C. Nous sommes aujourd'hui en 2022, à ce jour le record de 2016 n'a pas été battu, mais la température moyenne annuelle n'est jamais retombée sous le niveau de 2014. L'avenir nous dira si la température terrestre a définitivement franchi un seuil en 2014 ; nous développerons cette question dans la section III.2.1.6 de la troisième partie de notre thèse. En mars 2017, David Carlson, directeur du Programme mondial de recherche sur le climat, déclara : «*Alors même que le puissant Niño de 2016 s'est dissipé, nous assistons aujourd'hui à d'autres bouleversements dans le monde que nous sommes bien en peine d'élucider: nous touchons ici aux limites de notre savoir scientifique concernant le climat et nous avançons maintenant en territoire inconnu*»¹⁸⁵. Depuis, chaque année le Bilan météorologique mondial conforte le constat de David Carlson. Nous y voyons que la température reste à des niveaux élevés, y compris durant les épisodes de refroidissement *La Niña*, et que les événements extrêmes ou atypiques se multiplient (records de températures locales, sécheresses, canicules...). C'est notamment le cas du Bilan météorologique mondial de 2021¹⁸⁶, publié le 22 mai 2022.

A l'issue de la période 2014–2016, l'intensification et la nouvelle visibilité de l'expression du changement climatique ont pesé sur la représentation que les décideurs politiques et économiques et plus largement les populations se font de ce changement. Cette représentation a franchi un seuil, d'autant que les médias ont communiqué sur les records de la température moyenne terrestre et sur la multiplication des événements climatiques extrêmes ou atypiques. Ces records et cette multiplication ont été suivis d'une mobilisation citoyenne que ce soit par les urnes, comme lors des élections européennes du 26 mai 2019 où le Parti vert européen passe de 6,9 % des suffrages en 2014 à 10,04 % en 2019, que ce soit sous la forme de manifestations de rue, comme lors des Grèves des lycéen-ne-s pour le climat initiées en 2018, ou encore via des procès intentés en justice, comme aux Pays-Bas, où le 20 décembre 2019 la Cour suprême a confirmé le verdict d'un tribunal qui, en juin 2015, avait sanctionné l'Exécutif pour ne pas avoir pris de mesures suffisantes face au dérèglement climatique, ou comme en France *l'Affaire du*

185 <https://public.wmo.int/fr/medias/communiqu%C3%A9s-de-presse/nombreux-records-pulv%C3%A9ris%C3%A9s-en-2016-dans-le-domaine-du-climat-avec-des>

186 <https://public.wmo.int/fr/medias/communiqu%C3%A9s-de-presse/records-battus-en-2021-pour-quatre-indicateurs-majeurs-du-changement>

siècle¹⁸⁷, initiée le 17 décembre 2018 et soutenue pas plus de deux millions de signataires en moins de trois semaines.

Cette mobilisation citoyenne n'a pas été sans effet sur le monde politique. Cependant, une erreur serait de considérer qu'elle serait le point initial de la montée en puissance actuelle de la mobilisation politique. Chronologiquement, auparavant il y a eu le développement de la dynamique science et politique au sein du GIEC qui se traduisit en l'adoption du RID de la contribution du GT1 au 5^e RE du GIEC, en 2013. Puis, il y a eu l'accord Chine États-Unis de 2014 et plus largement l'émergence d'une dynamique internationale en 2014 qui a abouti sur l'Accord de Paris en 2015. Celui-ci a été le point initial d'une démarche qui déboucha notamment sur la propagation de l'appropriation, la référence ou à tout le moins l'affichage (selon les acteurs) de l'objectif de neutralité carbone en 2050 (nous y reviendrons dans la prochaine section). Ce constat conforte l'hypothèse selon laquelle le consensus scientifique sur l'existence du changement climatique d'origine humaine s'est traduit - grâce au GIEC- en un consensus politique sur la reconnaissance de cette existence, puis en l'émergence d'un processus mondial d'engagement politique ; lequel processus a ensuite été constamment renforcé par le développement continu de la dynamique scientifique et politique du GIEC (rapport 1,5°C, 2018 ; 6^e RE, 2021), par l'observation vécue ou médiatisée des effets de plus en plus nombreux et puissants du changement climatique et par le déploiement de la mobilisation citoyenne.

II.3.3.5 - Une mobilisation et des objectifs nationaux déployés internationalement

Le 11 décembre 2019, soit 14 mois seulement après la publication du Rapport spécial 1,5°C, la Commission européenne présenta le projet de *Pacte vert pour l'Europe*, lequel devait notamment engager l'UE à atteindre la neutralité carbone en 2050, plus précisément la neutralité de l'ensemble des GES. Un an et demi plus tard, la loi sur le climat de l'UE¹⁸⁸ été adoptée (publiée le 9 juillet 2021). Conformément au projet de *Pacte vert*, elle intégrait « l'objectif juridiquement contraignant de ramener les émissions nettes de gaz à effet de serre à zéro d'ici à 2050 »

187 <https://laffaireduisiecle.net/qui-sommes-nous/>

188 https://ec.europa.eu/clima/eu-action/european-green-deal/european-climate-law_fr

et précisait que « *les institutions de l'UE et les États membres sont tenus de prendre les mesures nécessaires au niveau national et de l'UE pour atteindre cet objectif, en tenant compte de l'importance de promouvoir l'équité et la solidarité entre les États membres* ».

Auparavant, le 8 novembre 2019, la France avait adopté la loi n° 2019-1147 relative à l'énergie et au climat. Cette dernière, seulement quatre ans après l'introduction dans la loi française de l'objectif national de *facteur 4* (division par 4 des émissions de GES en 2050 par rapport au début du XXI^e siècle), substituait la neutralité carbone à ce *facteur 4*. En effet, cette loi remplace, dans le corpus législatif national, l'expression « *diviser par quatre les émissions de gaz à effet de serre* » par l'expression « *atteindre la neutralité carbone à l'horizon 2050 en divisant les émissions de gaz à effet de serre par un facteur supérieur à six* ». Puis elle précise : « *La neutralité carbone est entendue comme un équilibre, sur le territoire national, entre les émissions anthropiques par les sources et les absorptions anthropiques par les puits de gaz à effet de serre, tel que mentionné à l'article 4 de l'accord de Paris ratifié le 5 octobre 2016. La comptabilisation de ces émissions et absorptions est réalisée selon les mêmes modalités que celles applicables aux inventaires nationaux de gaz à effet de serre notifiés à la Commission européenne et dans le cadre de la Convention-cadre des Nations unies sur les changements climatiques, sans tenir compte des crédits internationaux de compensation carbone* ».

En septembre 2020, la Chine s'est engagée à atteindre la neutralité carbone en 2060. Début 2021, suite à l'élection de Joe Biden, les États-Unis ont pris l'engagement d'atteindre cet objectif en 2050. Au plan international, c'est au tour du G7, lors du sommet de Cornwall¹⁸⁹ (Royaume-Uni) tenu du 11 au 13 juin 2021, d'adopter cet objectif. Puis le 13 octobre 2021, en amont de la COP26 de Glasgow, la Russie a annoncé son engagement à atteindre la neutralité avant 2060. Enfin, le 1^{er} novembre 2021, jour de l'ouverture de la COP26, vint l'engagement de l'Inde, pour 2070. Dès septembre 2021, dans 131 pays, couvrant 72 % des émissions mondiales de GES, la montée en puissance de l'objectif de neutralité carbone à l'horizon 2050 (2060 pour la Chine et la Russie, 2070 pour l'Inde), s'était concrètement traduite en une mise en discussion au plus haut niveau politique, en un engagement ou en une adoption juridique (Höhne, 2021).

189 <https://www.consilium.europa.eu/media/50361/carbis-bay-g7-summit-communique.pdf>

II.3.3.6 – La mobilisation de la Chine

Les données de cette section sont essentiellement tirées de l'ouvrage de Nathalie Bastianelli, *Quand la Chine s'éveille verte...* (Bastianelli, 2021) et de celui de Jean-Paul Maréchal, *La Chine face au mur de l'environnement* (Maréchal, 2017).

Devenue la grande puissance industrielle de l'humanité, l'« usine du monde », depuis 2007 la Chine est la nation dont les émissions directes de GES sont les plus importantes au monde. Sa mobilisation pour atténuer le changement climatique est donc un enjeu mondial de tout premier plan. En réponse à ces émissions et aux manifestations du changement climatique sur son propre territoire, mais aussi en réponse aux pollutions devenues extrêmes, en particulier à Pékin, la Chine opéra des changements d'orientation progressivement à partir du milieu des années 1990, puis au milieu des années 2010 elle prit un tournant majeur (Bastianelli, 2021, p.43). Dans ce contexte, nous avons vu que le 11 novembre 2014, soit un an après la publication de la contribution du GT1 au 5^e RE du GIEC, la Chine et les États-Unis signèrent un accord bilatéral où la Chine s'engagea à atteindre un pic d'émission de GES au plus tard en 2030 ; engagement toujours maintenu, aujourd'hui en 2022, et complété depuis septembre 2020 de celui d'atteindre la neutralité carbone en 2060. Ces engagements sur la scène internationale sont accompagnés d'une diversité de déclinaisons dans l'Empire du milieu, dont notamment :

- Une campagne idéologique, avec la promotion des nouveaux concepts de *Confucianisme vert* et de *Civilisation écologique* ; celle-ci est inscrite dans la constitution chinoise depuis 2018. Si bien que « *la conscience de la connexion entre l'homme et la nature reprend une place progressivement* » (Bastianelli, 2021, p.14).

- Une évolution juridique avec, par exemple, l'obligation faite, à partir de 2014, « *aux entreprises polluantes, y compris les grands groupes publics, à publier les chiffres de leurs émissions de CO₂ et de leurs rejets dans les rivières* » (Bastianelli, 2021, p.43). Un autre exemple notable est, depuis 2013, un alourdissement conséquent des sanctions - des années de prison et jusqu'à la peine de mort en cas de décès de victimes - qui frappent les industriels et les fonctionnaires chargés de la supervision environnementale, responsables de pollutions importantes.

- Un volet financier. Ainsi « *Les centrales solaires se sont multipliées sur le territoire à grands coups de subventions d'État avec une croissance très forte sur la période 2013-2019 (+ 70 % par an)* » (Bastianelli, 2021, p.33). En 2018, 71 % du parc solaire mondial était situé en Chine.

- Une mobilisation sociale. « *Une frange de la société chinoise se mobilise pas à pas, mais de façon croissante face aux enjeux de pollution et de changement climatique alors qu'un virage vert a commencé à s'amorcer dans le pays. Des innovations vertes émergent et changent la donne ; une consommation plus responsable, notamment dans la mode et le tourisme, voit le jour ; le végétarisme prend de l'ampleur ; une économie collaborative se développe à grande échelle ; des citoyens et des villes adoptent la politique « zéro déchet » (...)* » (Bastianelli, 2021, p.14).

Toutefois, rappelons que l'objectif auquel s'est engagé la Chine avant 2030 et celui d'un pic, d'un maximum d'émissions atteint. D'ici là, les émissions peuvent continuer à augmenter ; ce qui se traduit, par exemple, par la décision prise en 2018 de la construction de 155 centrales électriques au charbon.

II.3.4 - Le leurre de la quantification

Ces dernières années, malgré un contexte de confrontation, une convergence émerge entre les grandes puissances politiques (Union européenne¹⁹⁰, États-Unis, Chine, Inde...) autour d'objectifs de moyen-long termes qui exigent un véritable engagement et une transformation technosociale, afin d'apporter des réponses à des problèmes communs, planétaires, extrêmement complexes et porteurs de menaces majeures pour l'humanité dans les décennies et siècles à venir ; notamment le changement climatique. Cette convergence constitue un événement historique majeur. Amorçe-t-il un tournant de l'histoire de l'Humanité (Voir Annexe 1, 3^e partie) ? Son objectif le plus emblématique est celui de neutralité carbone vers 2050 afin de maîtriser le changement climatique ; avec toutefois des incertitudes sur la réalisation effective de cet objectif et des interrogations sur la nature, la qualité voire les effets néfastes des chemins suivis pour y parvenir ou s'en approcher.

190 Voir le site de la Commission européenne [URL :

https://ec.europa.eu/info/strategy/priorities-2019-2024/european-green-deal_fr].

Nous avons vu que l'objectif de neutralité carbone en 2050 repose sur des scénarios du GIEC qui couvrent le XXI^e siècle. Plus généralement, ces scénarios donnent des repères aux politiques, lesquels peuvent s'en saisir. Toutefois, ces scénarios donnent une représentation édulcorée de ce que les avancées scientifiques nous disent des évolutions du climat durant la seconde partie du XXI^e siècle, voire avant même le milieu du siècle. En effet, des phénomènes qui pourraient alimenter le réchauffement global durant la seconde moitié du XXI^e siècle, voire avant, ne sont pas ou pas pleinement pris en considération par les scénarios pour le XXI^e siècle. Il s'agit de phénomènes scientifiquement identifiés, mais dont l'évolution n'est pas quantifiable, tels que des émissions de méthane dans l'atmosphère dues au dégel du pergélisol, à la fonte de glaciers polaires, à la fonte d'hydrates des fonds marins ou aux bouleversements du vivant marin (questions sur lesquelles nous reviendrons largement dans la troisième partie de notre thèse) ; mais aussi de phénomènes éventuellement non encore identifiés, que la science, d'un point de vue logique, et le politique, d'un point de vue responsable, ne peuvent pas ne pas prendre en considération. Finalement, le propos suivant, approuvé par l'assemblée plénière du GIEC en 1995, demeure d'actualité : « *Il reste des incertitudes sur ce qu'il est utile de connaître pour juger de ce qui constitue une perturbation anthropique dangereuse du système climatique et des mesures à prendre pour éviter de telles perturbations. (...). Le problème n'est pas de définir aujourd'hui la meilleure politique pour les 100 ans à venir, mais de choisir une stratégie prudente et de l'adapter ultérieurement en fonction des nouvelles informations disponibles.* »¹⁹¹.

Ainsi, les objectifs politiques, tels que celui de neutralité carbone en 2050, fondés sur les scénarios climatiques du GIEC, ne sont pas fondés sur l'ensemble des connaissances scientifiques, mais sur des artefacts basés sur une part seulement des connaissances scientifiques. Plus précisément, ces scénarios, ces artefacts, ne prennent pas en considération certaines composantes du réel, à savoir les phénomènes appartenant au *Reste causal* associé à ces scénarios du GIEC, qui pourraient amplifier le changement climatique et affecter de manière grave et irréversible l'environnement et le bien-être de l'humanité. Si bien que la pertinence des objectifs politiques tels que la neutralité carbone ne reposent pas sur la science, bien qu'ils s'appuient sur une certaine production scientifique. Aussi, toute communication de ces objectifs dans l'espace public sans y

191 2^e RE, Document de synthèse des informations scientifiques et techniques relatives à l'interprétation de l'article 2 de la convention-cadre des nations unies sur les changements climatiques, section 8.2.

associer la présentation du *Reste causal* associé aux scénarios climatiques qui constituent le fondement de ces objectifs, propagerait le leurre d'une quantification qui invisibiliserait tout un ensemble de connaissances scientifiques. Enfin, toute stratégie de mobilisation et de transition qui se baserait sur des objectifs chiffrés issus des seuls scénarios du GIEC, reposerait sur un déni d'une partie du réel, sinon sur le pari que l'imprévisibilité du *Reste causal* associé aux scénarios du GIEC se traduirait, au moins au cours du XXI^e siècle, par une neutralité de ce *Reste*.

Cependant, pour être complet, nous notons que le niveau de l'imprévisible climatique au cours du XXI^e siècle varie en fonction croissante de, notamment, la quantité des émissions anthropiques de GES. Si bien que, pour un profil d'émission anthropiques donné, plus ces émissions sont faibles, plus les projections climatiques du GIEC pourraient être voisine d'une prédiction. Ainsi, vu que les projections associées aux profils d'émissions les plus astreignants du rapport spécial 1,5°C sont des projections associées à des niveaux d'émissions plus faibles que jamais dans les précédents rapports du GIEC, ces projections et corrélativement l'objectif de neutralité carbone en 2050 possèdent une plus grande légitimité à servir de référence pour la décision politique que ne l'ont toutes les projections climatiques antérieures du GIEC. De ceci, toutefois, nous ne pouvons déduire que nous pourrions oublier le nécessaire complément à cette référence quantifiée, à savoir son *Reste causal*.

Contribution épistémologique, le concept de *Reste causal*

Les scénarios du GIEC pour le XXI^e siècle reposent sur des modèles climatiques qui reposent eux-mêmes sur la collecte de données quantifiées toujours plus nombreuses, sur l'appel à des modélisations mathématiques toujours plus sophistiquées et sur un traitement par des ordinateurs toujours plus puissants. Ces modèles ne prennent pas en considération certains phénomènes pouvant ou devant influencer le changement climatique du XXI^e siècle, ces derniers constituent *Le Reste causal* associé aux scénarios du GIEC.

1 - Classification interne selon la nature de l'inconnu

Dans cette section nous nous situons dans le cadre du changement climatique et notre propos portera sur la modélisation et les scénarios climatiques.

Dans un *Reste causal* se trouvent des phénomènes que nous pouvons classer en fonction de la nature de l'inconnu dont ils sont détenteurs. A une extrémité, nous avons des phénomènes pour lesquels l'existence d'un impact sur le climat du XXI^e siècle est connue mais n'est scientifiquement pas suffisamment quantifiable (quelle temporalité ? Quelle ampleur ?...) ou pas encore suffisamment quantifiable - y compris en termes probabilistes- pour permettre une prise en compte pertinente dans les calculs de la modélisation climatique. Nous sommes là dans la **Catégorie du connu à l'impact connu mais non quantifiable ou non encore quantifiable**.

A l'autre extrémité, nous avons des phénomènes qui ne sont tout simplement pas connus, pas identifiés par la science au moment où les scénarios sont élaborés, mais qui, néanmoins, impacteront ou pourraient impacter le climat du XXI^e siècle. Nous sommes là dans la **Catégorie de l'Inconnu inconnu**. Nous nous arrêterons, au chapitre III. 2, sur l'un de ces phénomènes, dont l'importance est majeure mais qui n'a été découvert qu'en 2014. Il s'agit de populations de bactéries méthanogènes qui vivent dans les océans et sont restées inconnues jusqu'à cette date ré-

cente. Ce phénomène, qui était un inconnu inconnu, n'avait donc pas pu être pris en considération dans le 5^e RE du GIEC, publié en 2013-2014. Ce même phénomène est toujours présent aujourd'hui dans le *Reste causal* associé aux scénarios climatiques ; par contre, il ne se situe plus dans la *Catégorie de l'Inconnu inconnu*, mais dans la *Catégorie du connu à l'impact inconnu* que nous abordons maintenant.

Entre les deux extrêmes que nous venons d'aborder, nous avons des phénomènes connus dont l'impact sur le climat durant le XXI^e siècle est inconnu, plus précisément des phénomènes pour lesquels aucune donnée empirique (présente ou passée) ni aucune loi naturelle connue ne vient appuyer l'hypothèse selon laquelle ces phénomènes pourraient impacter le climat au cours du XXI^e siècle ; mais des phénomènes qui, dans le même temps, portent un potentiel d'agir sur le climat. Ces phénomènes, nous les classons dans la ***Catégorie du connu à l'impact inconnu***. Un exemple de phénomène situé dans cette catégorie, du moins depuis 2014, ce sont les bactéries marines méthanogènes ; voir ci-dessus. Un second exemple, ce sont les populations d'archées méthanogènes qui se développent sous les glaciers polaires lorsque ces derniers subissent un processus de fonte (une présentation de ce phénomène sera donnée dans le chapitre III.2). Du moins, ces populations d'archées se situaient dans cette catégorie à partir de la fin du XX^e siècle et jusqu'à la fin de la décennie 2010. En effet, découverte vers la fin de XX^e siècle, elles étaient alors sorties de la *Catégorie Inconnu inconnu* pour entrer dans la *Catégorie du connu à l'impact inconnu*. Puis l'article de Christiansen et al. (2021) a eu pour conséquence le passage de ces archées méthanogènes de la *Catégorie connu à l'impact inconnu* dans la *Catégorie connu à l'impact connu mais non quantifiable ou non encore quantifiable*. En effet, selon cet article, ces archées produisent sous certains glaciers soumis à un processus de fonte, du méthane qui se dissout dans l'eau de fonte puis donne lieu à des émissions importantes de méthane et de dioxyde de carbone dans l'atmosphère.

Enfin, dans un *Reste causal* peut se trouver des phénomènes connus dont l'impact est connu, quantifiable voire quantifié, mais non intégrables ou plus simplement non intégrés. Par exemple certains modèles climatiques ne prennent pas en compte de tels phénomènes en raison des limites de la puissance de calcul des ordinateurs ou/et en raison d'une limite des moyens financiers, etc. Leur présence dans le *Reste causal* n'est alors pas liée à une part d'inconnu dont ils seraient détenteurs.

2 - Singularité

Dans cette section, nous élargirons notre approche à l'ensemble des productions scientifiques, par exemple aux sciences économiques, à propos desquelles dès les années 1930 l'économiste John Maynard Keynes avait alerté sur des excès de mathématisation reposant sur des « postulats simplificateurs » (M. Beaud et al., 1996, p.216) qui, de fait, renvoyaient des phénomènes majeurs dans ce que nous appelons le *Reste causal*.

La notion épistémologique de *Reste causal* est connexe aux notions d'inconnu, d'imprévisible et d'invisible, ainsi qu'à la notion de domaine de validité, mais elle ne peut se confondre avec aucune d'entre elles.

Elle ne peut se confondre avec la notion d'inconnu, car des phénomènes connus peuvent se situer dans *Le Reste causal*, nous l'avons vu, cela pour des raisons diverses, par exemple une incapacité à quantifier ou pour des raisons d'ordre idéologique ou politique ou encore en raison d'une insuffisante puissance de calcul.

Elle ne peut se confondre avec la notion d'imprévisible, car des phénomènes prévisibles peuvent se situer dans *Le Reste causal*. Ainsi, dans certains modèles climatiques des phénomènes prévisibles ne sont pas pris en compte, afin de simplifier la modélisation, par exemple en raison des limites de la puissance de calcul des ordinateurs. Concrètement, « *un modèle peut ne simuler que l'atmosphère, alors qu'un autre, plus complet, combinera l'atmosphère (et les réactions chimiques qui y interviennent), l'océan et les biosphères terrestre et marine* »¹⁹². D'autres exemples reposent sur des sous-jacents idéologiques ou politiques.

Elle ne peut se confondre avec la notion d'invisible ou d'invisibilisé. Par exemple, nous verrons dans la troisième partie de notre thèse que des éléments du *Reste causal* sont présentés dans certains Résumés à l'intention des décideurs (RID) des rapports du GIEC (par exemple les évolutions du forçage solaire ou volcanique dans le RID du Groupe1 du 5^e RE) et ne sont donc pas invisibles ou invisibilisés.

192 Extrait, page 3 de *Introduction aux modèles climatiques simples employés dans le Deuxième RE du GIEC*. 1^{er} février 1997. <https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/03/paper-II-fr.pdf>. Publié sous la direction de John T. Houghton, L. Gylvan Meira Filho, David J. Griggs, Kathy Maskell.

Enfin, la notion de *Reste causal* n'a pas une fonction équivalente à celle du domaine de validité. Ainsi, dans le cas des scénarios climatiques publiés dans le 5^e RE du GIEC, la définition du domaine de validité repose sur l'addition de plusieurs conditions nécessaires dont l'une est, certes, la non expression de l'ensemble des phénomènes du *Reste causal*, mais dont une autre est la validité de la *moyenne démocratique* utilisée pour faire la synthèse des simulations produites par un ensemble de modèles climatiques (voir *le sous-chapitre II.2.3.*).

TROISIÈME PARTIE

Études de cas

Les études de cas qui constituent notre troisième partie illustrent, renforcent et approfondissent les propos des deux parties précédentes portant sur la dynamique science et politique dans un contexte de quantophrénie et de haut niveau d'imprévisibilité.

Chapitre 1 - Science et politique : le *facteur 2*

Ce chapitre répond à deux intentions.

La première est d'intégrer au texte de la thèse notre première recherche relative aux scénarios dits du GIEC. C'est la porte par laquelle nous avons accédé au vaste domaine de la relation science et politique, en général, et telle qu'elle s'exprime au sein et autour du GIEC, en particulier.

La seconde intention, plus fondamentale, est d'apporter un éclairage sur la dynamique science et politique liée au GIEC, grâce à l'étude d'un phénomène particulier, à savoir le *facteur 2*, qui, notamment en France et au-delà au niveau du G8, a joué un rôle central dans la définition des politiques d'atténuation. Au cœur de ce phénomène, finalement transitoire, se trouvaient des jeux d'acteurs politiques et scientifiques de plus haut niveau. A sa périphérie, se trouvèrent des organisations militantes engagées pour la défense de l'environnement, en particulier pour nettement contenir le changement climatique ; des organisations qui, néanmoins, partagèrent une croyance en ce *facteur 2*, sans fondement scientifique, porteur d'une vision édulcorée des politiques nécessaires pour contenir ce changement. Finalement, ce chapitre montre très concrètement comment le contexte de quantophrénie et d'invisibilisation de l'imprévisible exposé dans le chapitre I.3 a pu peser sur le GIEC et s'inscrire dans la dynamique science et politique relative au réchauffement climatique, du moins au niveau de la France puis à l'échelle du G8. Enfin, il apporte des éléments d'éclairage du processus d'enrichissement et de renforcement continu du consensus politique international relatif au changement climatique.

Définition

L'expression *facteur 2*, aujourd'hui abandonnée, signifiait la réduction à l'échelle planétaire de 50 % des émissions anthropiques de gaz à effet de serre (division par 2) « d'ici à 2050 », sinon « entre 1990 et 2050 ». Le plus souvent lui était associée l'affirmation selon laquelle ce serait la

condition à remplir ou l'objectif à atteindre afin de contenir le réchauffement climatique ou d'en limiter la gravité. Pour les pays industrialisés, tels que les pays occidentaux, le *facteur 2* se déclinait couramment en *facteur 4* (réduction de 75 %), sinon en *facteur 4 ou 5* (réduction de 75 % ou de 80%).

Promu dès 2003 par la France¹⁹³, à l'occasion de l'Assemblée plénière du GIEC tenue à Paris, le *facteur 2* a reçu le soutien du G8 le 8 juillet 2008, lors du sommet de Toyako¹⁹⁴. Lors de chacun de ces deux événements, le Premier ministre français puis le G8, respectivement, fondèrent explicitement leur objectif politique (le *facteur 2*) sur les travaux du GIEC, sans cependant le présenter comme une production du GIEC. Notons, pour finir, que le *facteur 2* ne sera jamais repris par les COP de la CCNUCC.

III.1.1 - Chronologie d'une montée en puissance : rôle du GIEC, du G8, du gouvernement français et d'un scientifique français

Dans ce sous-chapitre, nous allons observer des faits portant sur la frontière et les interactions entre l'expertise produite par le GIEC, d'un côté, et les propos, engagements et décisions d'ordre politique, de l'autre. Nous aborderons en particulier le rôle d'un expert scientifique dans la diffusion d'un objet politique, sans porter de jugement ou émettre de critique sur ce rôle inscrit dans un contexte et une dynamique politiques et scientifiques aux enjeux majeurs et complexes.

III.1.1.1 – Présentations préliminaires

193 <https://www.vie-publique.fr/discours/135280-declaration-de-m-jean-pierre-raffarin-premier-ministre-sur-la-positio>

194 <https://www.vie-publique.fr/discours/171592-declaration-des-chefs-detat-et-de-gouvernement-du-g8-sur-la-protection>

Le G8 : « *Le G8 n'est pas une institution, c'est un club qui réunit annuellement les chefs d'État ou de gouvernement des pays les plus industrialisés (Allemagne, Canada, États-Unis, France, Italie, Japon, Royaume-Uni) auxquels s'ajoutent le président de la Commission de l'Union européenne et, depuis 1997, le président de la Russie* ». ¹⁹⁵ Cette définition proposée par l'*Encyclopédie Universalis* donne la composition du G8 durant une période dont il sera ici question, qui inclut les années 2007 et 2008. Depuis, ce « club » a connu deux évolutions : désormais le Président du Conseil européen y participe aux côtés de la Présidente de la Commissions de l'UE, d'une part ; la Russie en a été exclue en 2014, si bien qu'il s'agit aujourd'hui du G7, d'autre part.

Jean Jouzel

Jean Jouzel est né le 5 mars 1947. Il obtint un diplôme d'ingénieur de l'École supérieure de chimie industrielle de Lyon, en 1968, et un doctorat de physique en 1974, dont la thèse porte sur la formation de grêlons et la mesure dans de faibles quantités d'eau de deux isotopes de l'hydrogène, le tritium et le deutérium. Puis il entra au CEA (laboratoire de géochimie isotopique, situé sur le site de Saclay, en région parisienne) où il fera toute sa carrière, d'abord ingénieur de recherche puis directeur de recherche .

Nous avons vu que, le 1^{er} octobre 1987, trois articles (Jouzel & *al.*, 1987 ; Barnola & *al.*, 1987 ; Genthon & *al.*, 1987) de la revue *Nature* présentèrent les résultats d'analyses de la calotte glaciaire de Vostock (Antarctique) qui établirent empiriquement et à l'échelle globale de la planète le lien entre la concentration de CO₂ dans l'atmosphère et le réchauffement climatique. L'impact médiatique fut notable. Jean Jouzel, fort de ses compétences sur la mesure de la teneur en deutérium, avait contribué à l'étude dont les résultats étaient publiés dans ces articles. Premier auteur du premier d'entre eux et co-auteur du troisième, il fit alors son entrée sur la scène publique française. Plus de trente ans plus tard, à la question de Nathaniel Herzberg, journaliste au *Monde*, « *Et cela donnera la fameuse couverture de la revue « Nature », en 1987, et trois articles qui marquent un tournant dans votre discipline. Que démontrez-vous ?* », Jean Jouzel répond : « *D'abord, nous analysons la teneur des carottes en deutérium, c'est-à-dire en hydrogène lourd. Nous reconstituons ainsi la température sur 150 000 ans. Dans le même temps, l'équipe de glaciologie de Grenoble, où Claude Lorius avait fini par monter un laboratoire,*

¹⁹⁵ <https://www.universalis.fr/encyclopedie/g8>

parvient à extraire les bulles d'air présentes dans la glace et à mesurer ainsi la variation de concentration en gaz carbonique au cours du temps. Enfin, un troisième papier vient faire la synthèse et démontre que pendant les périodes froides il y a moins de CO₂ et que pendant les périodes chaudes il y en a davantage. Nous confirmons ainsi que ce qui préside aux grandes phases, c'est bien l'astronomie, la position de la Terre par rapport au Soleil, mais que lors des réchauffements le CO₂ amplifie le phénomène. »¹⁹⁶ Plus loin, il précise : « La presse du monde entier nous appelle et nos résultats sortent du sérail scientifique. Déjà, depuis des années, les modélisateurs travaillant sur l'atmosphère avançaient ce lien et faisaient des prévisions d'augmentation des températures provoquées par les émissions de gaz à effet de serre. Mais c'était des modèles, auxquels s'ajoutaient quelques expériences de laboratoire et les études sur l'atmosphère des autres planètes. Là, grâce au retour dans le passé, nous apportons des résultats concrets, portant sur la Terre, avec des courbes faciles à comprendre par les politiques. Et en 1988, le G7 de Reagan et Thatcher décide de créer le GIEC. Le premier mérite en revient aux modélisateurs, mais notre découverte a aidé à convaincre les décideurs. ».

Ne faudrait-il pas voir dans les deux dernières phrases un certain décalage avec la réalité ? Cette question mérite d'être posée car, comme nous l'avons vu, chapitre I.1, la décision de la création du GIEC avait été prise par l'OMM dès le mois de juin 1987, et non pas par le G8 en juin 1988. Lors de sa rencontre de 1988, le G8 a simplement soutenu la décision prise par l'OMM. Cependant, ce soutien du G8, postérieur de plus d'un semestre à la publication des trois articles de *Nature*, constitue un acte politique important, puisqu'il est celui des chefs d'État et de gouvernement d'un groupe de pays qui, en 1987, représentait encore, ensemble, une puissance économique dominante et responsable de la très grande part des émissions de GES. Pour autant, la décision de créer le GIEC n'a pas été prise par le G7 en 1988. Par ailleurs, nous avons vu que la présentation des résultats de Vostock avait été faite par Claude Lorius lors de la conférence de Villach, dès le mois d'octobre 1985, soit vingt mois avant la décision de l'OMM. Si bien que ces résultats ont effectivement pu « aider à convaincre les décideurs » au sein de l'OMM. Il est en outre remarquable que cet interview minore le rôle joué par C. Lorius dans la découverte de Vostock. En effet, C. Lorius n'est cité que pour la mesure de la variation du taux

196 Jean Jouzel, « L'effondrement n'est pas imminent. Je nous vois griller à petit feu », entretien par par [Nathaniel Herzberg](#), 2 juin 2019, Le Monde.fr, réservé aux abonnés.

de CO₂, alors qu'il était l'initiateur, l'architecte, l'organisateur et le coordinateur de l'ensemble du projet¹⁹⁷.

Octobre 1985	Juin 1987	Octobre 1987	Juin 1988	Novembre 1988
Conférence de Villach, présentation de Lorius	Décision de créer le GIEC	Publication des articles de Vostock	Soutien du G8	Création du GIEC

Quelques années après la publication des trois articles de *Nature*, en 1994¹⁹⁸, Jean Jouzel prend de premières responsabilités au sein du GIEC et devient l'un des cinq auteurs principaux du chapitre 3 (intitulé *Variabilité et changements climatiques observés*) de la contribution du groupe 1 au 2^e RE du GIEC, publié en 1995. Puis il sera l'un des huit auteurs principaux du chapitre 2 (lequel reprend l'intitulé *Variabilité et changements climatiques observés*) de la contribution de ce même GT1 au 3^e RE (2001). Ensuite, de 2002 à 2015 il sera l'un des six vice-présidents du groupe 1 du GIEC (et non pas vice-président du GIEC, contrairement à ce qui est fréquemment affirmé¹⁹⁹), et co-auteur du projet du Résumé à l'intention des décideurs (RID) de la contribution du GT1 au 4^e RE (2007).

Enfin, il est à noter que Jean Jouzel est un excellent communicant. Il a su mettre, et met toujours, son talent et ses compétences au service de la prise de conscience par un large public du changement climatique et de la nécessité et de l'urgence d'une mobilisation pour tout à la fois atténuer ce changement et s'y adapter.

197 C'est pourquoi il est cité comme co-auteur de chacun des trois articles publiés dans *Nature*.

198 <https://www.cea.fr/multimedia/Pages/videos/culture-scientifique/climat-environnement/webdoc-climat/interview-jean-jouzel-comment-giec-peut-prevoir-le-climat-futur.aspx>

199 Voir par exemple Lorius et Carpentier (2010, p.47).

III.1.1.2 – 1990 : Premier rapport d'évaluation du GIEC

Dans son premier rapport d'évaluation, le GIEC publia des scénarios climatiques pour le XXI^e siècle²⁰⁰. Le plus exigeant d'entre eux amorce sans attendre une décroissance des émissions anthropiques de dioxyde de carbone, lesquelles atteignent une réduction de 50 % en 2050 par rapport à 1985 (nous trouvons ainsi ici le *facteur 2*, que nous ne retrouvons nulle part ailleurs dans ce rapport), pour ensuite se stabiliser. C'est donc un scénario de stabilisation des émissions de dioxyde de carbone, et non pas, comme dans les rapports d'évaluation suivants, un scénario de stabilisation de la concentration. D'ailleurs, dans ce scénario, la concentration de CO₂ présente un accroissement continu pour atteindre un doublement en 2100 par rapport à la période préindustrielle. Quant aux émissions de méthane, elles présentent une baisse à partir de 2025 qui se poursuit tout au long du XXI^e siècle ; en 2050 elles se situent approximativement au niveau de 1985.

Notons que si le *facteur 2* apparaît ainsi dans le scénario le plus exigeant du 1^{er} RE, c'est uniquement à propos du dioxyde de carbone et non pas pour l'ensemble des GES. Mais, aussi et surtout, dans ce rapport rien n'indique que ce scénario permette de contenir le réchauffement à un niveau satisfaisant où les conséquences néfastes pourraient être perçues comme acceptables ; bien au contraire, puisque ce scénario présente un doublement de la concentration de dioxyde de carbone en 2100 par rapport à la période pré-industrielle, soit un taux de 520ppm. Enfin, dans notre chapitre III.3, nous verrons que le RID de ce 1^{er} RE expose de façon étayée que « *le changement climatique sera probablement plus important que les estimations données* » par les scénarios. Par conséquent, dans le 1^{er} RE du GIEC le *facteur 2* du scénario le plus exigeant n'apparaissait nullement comme une donnée scientifique que les politiques pouvaient traduire en un repère ou un objectif politique.

200 *The IPCC Overview of the IPCC First Assessment Report, Appendix, Emissions scenarios developed by IPCC.* 1992. Page 61.

III.1.1.3 – 1995 : deuxième rapport d'évaluation du GIEC

Selon le 2^e RE, « les modèles du cycle du carbone indiquent qu'une stabilisation immédiate de la concentration de dioxyde de carbone à son niveau actuel ne pourrait être obtenue qu'au prix d'une réduction immédiate de 50 à 70 % des émissions de ce gaz et de réductions plus importantes par la suite »²⁰¹. Ce propos, qui concerne l'immédiateté et non pas l'année 2050, est purement théorique, car une réduction d'une telle hauteur n'est pas réalisable dans l'immédiat.

Quant aux scénarios, font-ils apparaître le facteur 2 ? Le plus exigeant présenté dans ce 2^e RE passe en 2050 par une réduction de seulement un peu moins de 30 % des émissions par rapport à 1995²⁰². Nous sommes donc là bien en deçà du *facteur 2*. Notons que tous les scénarios de ce rapport sont des scénarios de stabilisation de la concentration de GES et passent tous ponctuellement, à une date variable (2065 pour le plus ambitieux, 2300 pour le moins ambitieux), par des émissions de CO2 réduites de moitié par rapport aux émissions de l'an 2000. Au-delà de cette date, afin de maintenir la stabilisation du taux de CO2, leurs émissions de ce GES se réduisent toujours davantage, en raison de la diminution de la quantité de CO2 captée par les océans et les continents au cours du changement climatique.

III.1.1.4 - Interview de Jean Jouzel, « membre du GIEC », novembre 2000

Extrait du résumé de l'interview de Jean Jouzel, présenté comme « membre du GIEC », par Nicolas Chevassus-au-Louis, journaliste scientifique²⁰³ : « *L'objectif était de revenir en 2010 à des niveaux d'émission de 5% inférieurs à ceux de 1990. Soulignons ici que ceci ne représente qu'une étape car l'objectif ultime d'une stabilisation des concentrations des gaz à effet de serre, fixé par les gouvernements, requiert que ces émissions diminuent environ d'un facteur 2.* »

Rappelons que, comme le précise J. Jouzel, les gouvernements ont bien fixé un objectif de stabilisation des concentrations des gaz à effet de serre ; cela dès 1992 (voir l'article 2 de la CCNUCC). Par contre, nous notons que dans son propos, Jean Jouzel, interviewé en tant que

201 Document de synthèse des informations scientifiques et techniques relatives à l'interprétation de l'article 2 de la convention-cadre des nations unies sur les changements climatiques, section 4.7.

202 Document de synthèse de l'ensemble du rapport. Version française. Page 17.

203 Publié sur le site de l'ENS de Lyon : <https://planet-terre.ens-lyon.fr/pdf/la-haye.pdf> . Vu le 9 octobre 2022.

« membre du GIEC », met en avant le *facteur 2*, qu'il présente comme requis pour atteindre l'objectif ultime (la stabilisation de la concentration) et qu'il oppose à la réduction de 5 % simple passage vers cet objectif ultime ; alors que, comme nous venons de la voir, ce facteur, en tant qu'objectif à atteindre pour stabiliser la concentration de GES à un niveau politiquement satisfaisant ou acceptable, n'était présent – ni explicitement ni implicitement, ni de loin ni de près - dans aucun des rapports publiés par le GIEC depuis sa création en 1988. Enfin, pour être complet, notons que le *facteur 2* du propos du « membre du GIEC » n'est pas associé à l'année 2050 (ni à aucune autre date), il ne s'agit donc pas du *facteur 2* dont il sera question par la suite.

Certes, nous avons noté que les scénarios du 2^e RE passent tous à une date donnée (2065 pour le plus ambitieux, 2300 pour le moins ambitieux) par une réduction de 50 % des émissions de CO₂ par rapport à la période préindustrielle ; tout comme ils passent tous à une date donnée par une réduction de 25 % ou de 75 %. Dans ce 2^e RE, lequel est le plus récent des RE précédant l'interview de J. Jouzel, rien ne distingue la réduction de 50 % des autres niveaux de réduction ; rien ne justifie de mettre en exergue un facteur 2. Nous verrons qu'il en est de même du 3^e RE, publié l'année suivante, en 2001, dont J. Jouzel était un des auteurs principaux.

Pour quelle(s) raison(s) J. Jouzel promouvait-il ce facteur 2 ? L'hypothèse d'une explication « scientifique » se présente. Cette hypothèse est celle d'un raisonnement erroné que nous trouvons dans les années 2000 sous diverses plumes.

Il nous faut tout d'abord rappeler que Jean Jouzel était, en 2000, l'un des auteurs principaux d'un chapitre du 3^e RE du GIEC intitulé « *Variabilité et changement climatiques observés* » ; il avait déjà occupé exactement la même position lors de la rédaction du 2^e RE. En cette année 2000 et contrairement à ce qu'il en sera par la suite de son parcours au sein du GIEC, il n'était donc pleinement légitime à parler au nom du GIEC, que sur le climat observé, et non pas sur le futur climatique. Par ailleurs, la connaissance du changement observé, mais la connaissance du seul changement observé, amenait logiquement au *facteur 2*, du moins dès lors que la représentation du futur était conçue à l'image du présent.

En effet, durant la décennie 1990 et en l'an 2000, année du propos de J. Jouzel, les océans et les continents absorbaient une quantité de CO₂ environ égale à la moitié du montant des émissions anthropiques. Sur cette base, réduire d'un *facteur 2* les émissions entraînerait mécaniquement

une stabilisation du taux de CO₂ dans l'atmosphère. Cependant, un fait annule ce raisonnement : la quantité de CO₂ absorbée par les océans et les continents n'est pas une constante ; nous développerons ce point ci-dessous. Si bien que, dès lors que l'on s'éloigne de l'an 2000, le facteur 2 n'a plus de pertinence. D'ailleurs, même appliquée de façon ultra rapide au début du XXI^e siècle, la réduction par deux des émissions de CO₂ aurait nécessité de réduire, par la suite, toujours davantage les émissions afin de stabiliser la concentration ; en effet l'absorption par les océans et les continents devrait décroître avec le temps.

Le niveau d'absorption de dioxyde de carbone par les océans et les continents dépend notamment du climat, de la composition chimique de l'atmosphère, de la composition chimique des océans et du vivant. Par exemple, cette absorption décroît lorsque la température de l'eau de surface des océans croît ainsi que lorsque la quantité de CO₂ stockée dans les océans croît. Par conséquent, l'objectif « ultime » d'une stabilisation de la concentration de CO₂ ne requière pas que les « émissions diminuent d'un facteur 2 », mais d'un facteur très nettement supérieur à 2, comme l'indiquent les scénarios de stabilisation publiés par le GIEC depuis le deuxième rapport d'évaluation de 1995.

L'hypothèse, selon laquelle Jean Jouzel aurait fait un raisonnement omettant la diminution de la capacité d'absorption des océans et des continents, est confortée par le fait que, dans son propos, il n'énonce qu'une seule condition requise pour atteindre une telle stabilisation - baisser les émissions de GES d'environ un *facteur 2* par rapport à l'année 1990 ou l'année 2000 (son propos laisse ouverte la possibilité de ces deux dates) – et ne donne ni le moment où ce *facteur 2* devrait être atteint ni le niveau de stabilisation visé. En effet, cela signifie que la date et le niveau n'importeraient pas, ce qui suppose que la capacité d'absorption de CO₂ par les continents et les océans serait une constance égale à la moitié des émissions anthropiques de l'année 1990 ou de l'année 2000 ; supposition contraire à la réalité, nous l'avons vu.

III.1.1.5 - 2001 : 3^e rapport d'évaluation du GIEC

Le 3^e rapport du GIEC, tout comme ceux qui l'ont précédé, ne contient aucun propos en faveur du *facteur 2*. Ce rapport ne contient d'ailleurs aucun objectif chiffré d'émissions de gaz à effet

de serre à une date donnée ni aucun propos pouvant suggérer un tel objectif. Au contraire, le GIEC y fait preuve de prudence. Ainsi nous pouvons lire dans le Résumé technique (RT) de la contribution du GT3 : « *Il découle de ce qui précède que l'établissement du "chiffre magique" (c'est-à-dire la limite supérieure du changement climatique mondial ou de la concentration de GES dans l'atmosphère) sera un long processus dont la source sera principalement politique, aidée, espérons-le, par l'amélioration de la connaissance scientifique.* » (VOA²⁰⁴). Nous notons que, contrairement au *facteur 2*, ce « chiffre magique » ne concernait pas une limite des émissions de GES, mais une limite du changement climatique ou de la concentration des GES. Plus loin, ce RT poursuit en ces termes : « *Compte tenu des grandes incertitudes qui caractérisent chaque composante du problème du changement climatique, il est difficile pour les décideurs d'établir aujourd'hui un niveau de stabilisation des concentrations de GES acceptable à l'échelle mondiale.* »²⁰⁵ (VOA²⁰⁶).

Quant à définir un niveau d'émissions de GES ou plus largement un scénario d'émissions couvrant le XXI^e siècle, cela représentait alors et représente encore aujourd'hui une difficulté encore bien plus importante, en raison de la part d'imprévisible de la réponse du système bio-Terre aux émissions de GES et au réchauffement à venir ; si bien qu'aux difficultés présentées par la définition d'un objectif de concentration « acceptable à l'échelle mondiale » s'ajoutent celles, majeures, de définir un objectif d'émissions permettant d'atteindre cet objectif de concentration. A ce sujet, nous reproduisons ici à nouveau un propos de L. Touzé-Peiffer (2018, p.128) : « *Plus notre compréhension de la 'machine terrestre' s'est affinée, plus nous avons pris conscience de sa formidable complexité. Les mécanismes du climat sont subtils et les nombreuses rétroactions en jeu nous échappent encore largement. Les progrès réalisés, certes remarquables, en appellent d'autres.* ». Si bien que ni le GIEC ni les climatologues n'étaient en capacité de promouvoir, sur des bases scientifiques, un objectif tel que le *facteur 2* ; ce qui justifie la position du GIEC exprimée ci-dessus par le GT3.

204 « *It follows from the above that establishing the "magic number" (i.e., the upper limit for global climate change or GHG concentration in the atmosphere) will be a long process and its source will primarily be the policy process, hopefully helped by improving science.* ».

205 GT3, RT, partie 10-4.

206 « *Given the large uncertainties characterizing each component of the climate change problem, it is difficult for decision makers to establish a globally acceptable level of stabilizing GHG concentrations today.* ».

Nous allons néanmoins observer les scénarios publiés dans le 3^e RE, puisque nous verrons dans la section III.1.1.8 que l'un d'entre eux, le plus ambitieux, sera utilisé de façon biaisée pour venir en support du *facteur 2*, mais aussi, et peut-être surtout, puisque nous montrerons que ces scénarios affichent une ambition finalement moins grande que celle de responsables politiques qui feront la promotion du *facteur 2*.

Le scénario le plus ambitieux²⁰⁷ de ce 3^e RE se termine par une stabilité de la concentration de CO₂ au niveau de 450ppm et passe, en 2050, par une réduction des émissions d'environ 38 % par rapport à l'année 2000. Enfin, il présente une élévation de température entre la période pré-industrielle et l'an 2100 située « très probablement » dans l'intervalle [1,8°C ; 3°C]²⁰⁸.

Il est à noter que le 3^e RE présente deux types de scénarios. Le premier type est celui des scénarios du 2^e RE (1995), nous y trouvons le scénario le plus ambitieux, celui que nous venons de présenter. Le second type est celui d'une nouvelle génération de scénarios. Une première publication de scénarios de cette génération a été faite un an plus tôt, en 2000, dans le Rapport spécial sur les scénarios d'émission (RSSE) ; les mêmes scénarios ont été republiés l'année suivante dans le 3^e RE. Chacun de ces scénarios RSEE voit en 2050 des émissions de GES supérieures à celles de l'an 2000²⁰⁹, donc très loin du *facteur 2*.

Enfin, il faut noter que, conformément au propos faisant preuve de prudence reproduit plus haut et dans le respect de la mission générale du GIEC qui exclut tout propos prescriptif, ce rapport ne présente jamais le scénario le plus ambitieux (450ppm), ni aucun autre scénario, comme convenant, acceptable ou nécessaire.

III.1.1.6 - Février 2003. Assemblée générale du GIEC. Paris. Allocution du Chef du gouvernement français.

La 20^e session de l'Assemblée générale du GIEC s'est tenue à Paris, les 19 et 20 février 2003. Le Chef du gouvernement français, Jean-Pierre Raffarin y a fait une allocution dont voici un ex-

207 Rapport de synthèse. Figure RID-6 Page 22.

208 Rapport de synthèse. Figure RID-7. Page 23.

209 Rapport de synthèse. Figure RID-3. Page 10.

trait²¹⁰ : « Même si le défi, aujourd’hui, ici et maintenant, peut nous paraître gigantesque, nous pouvons y arriver en nous mobilisant et en fixant des obligations de résultats. Les objectifs sont connus, ils sont précis. Il s’agit de diviser par deux les émissions de gaz à effet de serre avant 2050 à l’échelle de la planète. Pour nous, pays industrialisés, cela signifie une division par quatre ou par cinq. En vertu du principe de responsabilité commune mais différenciée, nous devons en effet montrer l’exemple en matière de mise en œuvre des politiques domestiques de lutte contre l’effet de serre. Certains pensent et veulent faire croire que c’est irréaliste. Je m’inscris en faux contre cette opinion qui est aussi une démission programmée face à nos responsabilités collectives. Regardons les chiffres : un tel objectif représente un gain annuel de 3%. Est-ce vraiment impossible à atteindre ? ».

Cette parole politique est remarquable, sous trois aspects. Tout d’abord, nous y trouvons l’affirmation, feinte ou sincère, exprimée devant l’Assemblée plénière du GIEC, et donc devant les représentants des gouvernements des pays membres du GIEC, selon laquelle le *facteur 2* est un objectif « connu » et « précis », sans toutefois indiquer l’origine de cet objectif. Ensuite, nous y trouvons l’affirmation, par le Chef du gouvernement français dont l’orientation politique est le libéralisme économique mondialisé, selon laquelle l’objectif de *facteur 2* serait réalisable. Enfin, en promouvant le *facteur 2*, le Chef de gouvernement français prenait une position plus ambitieuse que toutes celles étudiées par le GIEC, structure internationale à l’interface de la science et du politique. En effet, en l’an 2000 le GIEC avait publié de nouveaux scénarios, les scénarios RSEE, qui tous présentaient une quantité d’émissions de GES plus importante en 2050 qu’en 1990 ; puis le dernier et 3^e RE reprenait en 2001 les scénarios RSEE de 2000 ainsi que ceux du 2^e RE, dont le plus exigeant passait par une réduction de 38 % des émissions en 2050 par rapport à l’an 2000.

III.1.1.7 - Juin 2003. *Stratégie nationale de développement durable*, Comité interministériel pour le développement durable

Le 3 juin 2003, le Comité interministériel pour le développement durable publia la *Stratégie nationale de développement durable*. La parole politique du Chef du gouvernement français, te-

210 <https://www.vie-publique.fr/discours/135280-declaration-de-m-jean-pierre-raffarin-premier-ministre-sur-la-positio> Vu le 9 octobre 2022.

nue en février de la même année devant l'Assemblée plénière du GIEC, y trouva une première traduction en ces termes : « *Pour limiter ce réchauffement à quelques degrés, il nous faut diviser les émissions mondiales de gaz à effet de serre par deux d'ici 2050, ce qui, en tenant compte des différences de développement, implique pour les pays industrialisés une division par quatre ou cinq.* »²¹¹

III.1.1.8 – 2004. Engagement du ministre de l'écologie et du développement durable

A. Mars 2004.

En mars 2004, une Étude réalisée par la MIES²¹² était intitulée *La division par 4 des émissions de dioxyde de carbone en France d'ici 2050. Introduction au débat*. Son Éditorial introductif était signé par Serge Lepeltier, Ministre de l'écologie et du développement durable; en voici un extrait : « *Le troisième rapport du Groupe Intergouvernemental d'experts sur l'Évolution du Climat (GIEC) ne laisse plus de place au doute quant à la réalité du changement climatique (...). A la lumière du rapport des experts réunis au sein du GIEC et afin de limiter les impacts du changement climatique sur la planète, nous parvenons à la conclusion qu'il est nécessaire de limiter la concentration de dioxyde de carbone à moins de 450 parties par million en volume. Cette option est compatible avec l'objectif européen de tenter de contenir le réchauffement mondial à moins de 2 °C. Compte tenu de l'inertie du système climatique, nous n'en sommes d'ores et déjà pas loin. Si l'on retient cet objectif, c'est une division par deux des émissions mondiales de gaz à effet de serre dans leur ensemble qu'il nous faut opérer à l'horizon de 2050. Compte tenu de la responsabilité historique que portent les vieilles nations industrielles, et afin que le respect de cet objectif ne ruine pas les perspectives de développement des pays du Sud, cet objectif conduit à une division de l'ordre de quatre des émissions des pays industrialisés.* »

211 http://temis.documentation.developpement-durable.gouv.fr/docs/Temis/0055/Temis-0055105/16372_2003.pdf, page 19 du document. Vu le 9 octobre 2022.

212 Mission interministérielle de l'effet de serre (MIES), créée le 16 juin 1992 (soit deux jours après la clôture du Sommet de la Terre de Rio, 3-14 juin 1992), puis dissoute en 2008.

sés sur la même période. La France, ainsi que l'a indiqué l'an passé le Premier ministre devant l'assemblée du GIEC réunie à Paris, a fait sienne cette perspective. »

Ici le responsable politique utilise directement les travaux du GIEC, plus précisément le 3^e RE publié en 2001, pour justifier l'objectif de *facteur 2*. Toutefois, il ne dit pas que ces travaux prescrivent ou recommandent cet objectif, mais qu'« à la lumière du rapport », « limiter la concentration de dioxyde de carbone à moins de 450ppm » apparaît comme une contrainte à respecter ; puis, de là il expose une forme de raisonnement, en soutien duquel il ne présente aucune référence, qui mène au *facteur 2*.

En fait, l'ensemble du passage souligné (par nos soins) de cet extrait est une traduction quelque peu infidèle du scénario le plus ambitieux présenté dans le 3^e rapport, lequel, rappelons - nous, vise la stabilité de la concentration de CO₂ au niveau de 450ppm, passe en 2050 par une réduction des émissions de 38 % par rapport à l'année 2000, et présente, selon le GIEC, une élévation de température située très probablement (c'est-à-dire avec une probabilité d'au moins 90%) dans l'intervalle [1,8°C ; 3°C] entre la période préindustrielle et l'an 2100. Cette traduction infidèle repose sur une lecture erronée de chiffres de ce scénario, mais aussi et surtout sur une lecture biaisée de ce que signifie ce scénario.

Il y a bien une lecture erronée de chiffres de ce scénario. En effet, selon le Ministre, il s'agit de rester à moins de 450ppm et donc sous le scénario le plus ambitieux du 3^e RE du GIEC, et cela suffirait pour que l'augmentation de température reste sous les 2°C. Or, selon « la lumière du 3^e RE du GIEC », le scénario 450ppm présente une augmentation de température très probablement située entre 1,8°C et 3°C, ce qui signifie que rester à moins de 450ppm n'entraîne nullement de rester sous les 2°C. Le propos signé par le Ministre s'écarte donc ici notablement des « lumières du GIEC ». Puis, le propos du Ministre porte sur les émissions de GES et présente le *facteur 2* comme étant l'objectif à atteindre pour rester sous les 2°C et sous les 450ppm. Là, par contre, nous avons une traduction correcte des chiffres du 3^e RE du GIEC. En effet, le *facteur 2* est plus exigeant que les 38 % de réduction du scénario le plus ambitieux, il serait donc suffisant pour rester sous 450ppm (mais pas pour rester sous 2°C, nous venons de le voir). Finalement, ce *facteur 2* est issu d'une lecture erronée du scénario le plus ambitieux du 3^e RE, et sa traduction en un objectif politique est un acte politique pour lequel les références faites au GIEC sont discutables.

Ces références sont d'autant plus discutables qu'elles reposent sur une lecture biaisée de ce que signifient les scénarios de ce 3^e RE. Nous avons de la part du ministre (out de son ministère) une méconnaissance ou une non prise en compte volontaire et consciente de messages de prudence du GIEC, tels que celui que nous avons relevé plus haut dans le Résumé technique de la contribution du GT3 à ce même RE, et en particulier une méconnaissance ou non prise en compte volontaire et consciente de l'impossibilité de définir un « chiffre magique » (tel que le *facteur 2*) de limite aux émissions de GES permettant de rester sous les 2°C ou sous les 450ppm, notamment en raison de la part d'imprévisible de la réponse du système bio-Terre aux émissions de GES et au réchauffement à venir). Le scénario le plus exigeant du 3^e RE n'est qu'une projection, et n'est en rien une prédiction des évolutions du climat (répondant à une courbe donnée d'émissions de GES d'origine anthropique durant le XXI^e siècle) ; si bien que sa nature et sa signification enlèvent tout fondement scientifique au *facteur 2* de l'éditorial signé par le Ministre.

B. 22 juillet 2004.

Présentation du Plan climat 2004 au ministère de l'écologie et du développement durable²¹³.
Éditorial introductif du Ministre Serge Lepeltier.

Extrait : « *Ce défi climatique nous donne une nouvelle image de notre responsabilité collective par rapport à l'avenir : contenir la gravité du changement climatique en cours afin de contenir le réchauffement mondial à moins de 2°C d'ici la fin de ce siècle et nous adapter aux effets inévitables de ce changement climatique.*

Les travaux du GIEC (groupe intergouvernemental pour l'évolution du climat) nous tracent une voie exigeante mais essentielle : réduire de moitié les émissions mondiales d'ici 2050, soit par 4 ou 5 celles des pays industrialisés dans leur ensemble. Ce défi est réalisable, mais il exige de mobiliser toutes les connaissances, les techniques et les outils de gestion actuels, toute l'inventivité technologique, institutionnelle et organisationnelle dont nous pouvons faire preuve. »

L'appui sur les travaux du GIEC est ici réitéré, renforcé : ils « tracent une voie ».

213 PDF téléchargé.

III.1.1.9 - 13 juillet 2005. LOI n° 2005-781 de programme fixant les orientations de la politique énergétique

Article 2, extrait²¹⁴ : « *En outre, cette lutte devant être conduite par l'ensemble des États, la France soutient la définition d'un objectif de division par deux des émissions mondiales de gaz à effet de serre d'ici à 2050, ce qui nécessite, compte tenu des différences de consommation entre pays, une division par quatre ou cinq de ces émissions pour les pays développés.* »

Nous sommes ainsi passés progressivement du discours politique, au plan d'action, puis à la loi. Cependant, si cette loi introduit le *facteur 2* et le *facteur 4 ou 5*, elle ne fait pas de ce dernier un objectif national. Par contre, elle engage le gouvernement à défendre, soutenir ces facteurs 2 et 4 ou 5 sur la scène internationale.

Par la suite, à propos des facteurs 2 et 4 ou 5, le cadre législatif ne bougera pas durant dix ans, jusqu'à l'entrée en vigueur de la loi du 17 août 2015 (voir ci-après).

Ainsi la loi du 13 juillet 2005 répond à la nature globale du changement climatique, tant au niveau des causes (des activités locales impactent le climat dans sa globalité), qu'au niveau de l'atténuation (toute action locale d'atténuation du changement climatique a et n'a qu'une expression globale). Si bien que dès lors qu'une action locale d'atténuation a un coût local, dont éventuellement en termes de compétitivité économique, qui plus est dans une économie mondialisée, alors cette action locale ne pourra être envisagée ou pleinement envisagée que si elle s'inscrit dans une *lutte conduite par l'ensemble des États*. Ce constat, cette contrainte, est à la source de la création du GIEC, lieu institutionnel de construction d'un consensus hybride scientifique-politique, base d'une mobilisation politique internationale (voir chapitre II.1).

III.1.1.10 - Juin-septembre 2007. Publication du 4^e Rapport d'évaluation du GIEC

La Publication des contributions des groupes 1 et 3 a été réalisée en juin, celle du groupe 2 en juillet, et celle du rapport de synthèse en septembre.

²¹⁴ <https://www.legifrance.gouv.fr/jorf/id/JORFTEXT000000813253> . Vu le 9 octobre 2022.

Selon le Résumé technique de la contribution du groupe 3 : « Dans la majorité des scénarios liés à la catégorie de stabilisation la plus astreignante (I), il est indispensable que les émissions déclinent à partir de 2015 et poursuivent leur baisse pour aboutir à moins de 50 % des émissions actuelles vers 2050 » (VOA²¹⁵)²¹⁶. Nous y trouverions donc un appui au facteur 2. Cependant, le contenu de cet extrait, cet appui, repose sur une traduction infidèle et édulcorée des scénarios considérés. De surcroît, rien dans ce 4^e RE ne laisse entendre que cette catégorie, la plus astreignante, serait politiquement suffisante et satisfaisante. Dans le prochain sous-chapitre, nous reviendrons plus en détails sur cet extrait du RT du GT3 et nous étayerons notre analyse.

Notons toutefois de suite que les scénarios de la « catégorie de stabilisation la plus astreignante » présentent en fait en 2050 une réduction des émissions située entre 50 % et 85 % par rapport à l'année 2000. Dans le 3^e RE la réduction la plus astreignante était de 38 % en 2050 par rapport à cette même année 2000. L'évolution en six ans est notable, et situe le choix du GIEC au-delà du *facteur 2*.

Notons enfin que ce 4^e RE précise que : « c'est seulement dans le cas d'une élimination quasi complète des émissions que la concentration atmosphérique de CO₂ peut finir par se stabiliser »²¹⁷. Ceci est très éloigné du *facteur 2* intemporel présent dans l'interview de J. Jouzel de novembre 2000.

III.1.1.11 - 8 juin 2007. Déclaration des chefs d'État et de gouvernement du G8 d'Heiligendamm

Extrait : « La lutte contre le changement climatique est l'un des grands défis auxquels est confrontée l'humanité car le changement climatique risque de porter gravement atteinte à notre environnement naturel et à l'économie mondiale. Nous avons noté avec préoccupation les conclusions du récent rapport du GIEC. Nous avons la conviction qu'une action urgente et

215 « In the majority of the scenarios in the most stringent stabilization category (I), emissions are required to decline before 2015 and be further reduced to less than 50 % of today's emissions by 2050. ».

216 Technical Summary / Issues related to mitigation in the long-term context / Stabilization scenarios. Page 38-40. https://archive.ipcc.ch/publications_and_data/ar4/wg3/en/tssts-ts-3-2-stabilization-scenarios.html

217 Contribution intégrale du GT1 au 4^e RE, ch. 10, pp. 824 et 825.

concertée est nécessaire et nous acceptons la responsabilité qui nous incombe de montrer l'exemple dans la lutte contre le changement climatique. Lorsque nous définirons un objectif mondial de réduction des émissions dans le cadre du processus dont nous sommes convenus à Heiligendamm en impliquant tous les grands pays émetteurs, nous examinerons attentivement les décisions prises par l'Union européenne, le Canada et le Japon qui prévoient de réduire au moins de moitié les émissions mondiales d'ici à 2050. »²¹⁸

Ce sommet se tenait en Allemagne, sous la présidence d'Angela Merkel. Cette dernière obtenait là une double avancée politique : l'engagement des membres du G8 de définir un objectif mondial de réduction des émissions ; l'acceptation de mettre en avant le *facteur 2*.²¹⁹

Notons que le G8 s'appuie sur le 4^e RE du GIEC pour motiver sa mobilisation, mais en prenant soin de respecter les limites de la mission du GIEC qui ne peut émettre de recommandations. En particulier, de façon très juste, sa déclaration n'établit aucun lien entre le GIEC et le *facteur 2*.

III.1.1.12 - 10 octobre 2007. Assemblée nationale. – Audition de Jean Jouzel

Extraits du compte-rendu²²⁰ : « *La diminution par deux des émissions de gaz à effet de serre d'ici à 2050 – chiffre un peu mythique du G8 – assure simplement qu'on garde toutes les chances de son côté pour que le réchauffement climatique n'excède pas deux degrés par rapport au climat actuel. » « Au total, on défendra sans réticence l'objectif du facteur 4 pour la France. »*

Dans ce compte rendu, J. Jouzel est présenté comme « climatologue et glaciologue, directeur de l'Institut Pierre-Simon Laplace (IPSL) et membre du GIEC ». La portée de son propos repose donc sur une triple légitimité. Toutefois, J. Jouzel n'établit pas de lien entre le GIEC et le *facteur 2*, mais qualifie ce dernier de « chiffre un peu mythique du G8 » ; il situe donc ce chiffre dans le champ politique. Cependant, il affirme que grâce à ce chiffre « on garde toutes les chances (...) pour que le réchauffement climatique n'excède pas 2°C par rapport au climat ac-

218 <http://www.g8.utoronto.ca/francais/2007heiligidamm/france/2007-conclusions-fr.html>

219 Voir <http://gesd.free.fr/cerfa58.pdf> . Vu le 9 octobre 2022.

220 Compte rendu Groupe de suivi du « Grenelle de l'environnement ». Séance de 10 heures Compte rendu n° 3. <https://www.assemblee-nationale.fr/13/pdf/cr-grenelle/07-08/c0708003.pdf> .

tuel ». L'expert scientifique apporte ainsi officiellement devant les députés l'assurance de la pertinence scientifique de leur objectif politique. Les Parlementaires peuvent donc être rassurés et confortés dans le choix de cet objectif. Pourtant, nous l'avons vu, tant sur le plan scientifique que sur le plan de l'expertise du GIEC, rien ne vient en support de ce choix.

III.1.1.13 - 8 Juillet 2008. Déclaration des chefs d'État et de gouvernement du G8, Toyako

Paragraphe 22²²¹. « *Nous réaffirmons l'importance du quatrième rapport d'évaluation du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC), qui fournit l'évaluation scientifique la plus exhaustive, et nous encourageons le maintien d'une approche scientifique, servant de référence à notre action pour la protection du climat. Nous réaffirmons notre volonté de prendre la tête de la lutte contre le changement climatique (...)* ».

Paragraphe 23, Extrait²²². « *Nous prenons l'engagement d'éviter les conséquences les plus graves du changement climatique et nous sommes déterminés à parvenir à une stabilisation des concentrations atmosphériques des gaz à effet de serre à l'échelle de la planète, conformément à l'objectif ultime visé à l'article 2 de la Convention et dans un délai compatible avec la croissance économique et la sécurité énergétique. Atteindre cet objectif ne sera possible que grâce à la détermination commune de toutes les grandes économies, dans un délai approprié, à ralentir, stopper et inverser la croissance mondiale des émissions et mettre en place à terme une société sobre en carbone. Nous voulons partager la vision, avec toutes les parties à la CCNUCC, de réduire d'au moins 50 % les émissions mondiales d'ici 2050, et de considérer, pour l'adopter d'un commun accord, cet objectif, dans le cadre des négociations de la CCNUCC, tout en reconnaissant que ce défi mondial ne peut être relevé que par une action mondiale, notamment par les contributions de toutes les grandes économies, conformément aux principes de responsabilités communes mais différenciées et de capacités respectives de chaque pays.* »

221 <https://www.vie-publique.fr/discours/171592-declaration-des-chefs-detat-et-de-gouvernement-du-g8-sur-la-protection>

222 <https://www.vie-publique.fr/discours/171592-declaration-des-chefs-detat-et-de-gouvernement-du-g8-sur-la-protection>

Ainsi, dans cette déclaration le G8 accorde, paragraphe 22, une place centrale à la science, dont il affirme qu'elle « sert de référence » à son action, et s'appuie à nouveau sur le GIEC qui « fournit l'évaluation scientifique la plus exhaustive ». Dans le même temps, dans le paragraphe 23, il respecte les limites de la mission du GIEC, lequel ne peut émettre de recommandations, il ne présente donc pas de lien entre le *facteur 2* et le GIEC ni d'ailleurs entre le *facteur 2* et la connaissance scientifique.

Pour terminer, nous notons que, malgré la volonté du G8 exprimée dans cette déclaration, le *facteur 2* ne sera jamais repris dans les décisions des COPs de la CCNUCC.

III.1.1.14 - 2013-2014. Publication du 5^e rapport d'évaluation du GIEC

Dans ce rapport, pour la première fois l'un des scénarios de stabilisation du CO₂ n'a pas pour trajectoire une croissance du taux de ce GES dans l'atmosphère menant à une stabilisation, mais une croissance de ce taux, un passage par un maximum, puis une décroissance menant à une stabilisation ; il s'agit du scénario RCP2,6, le plus astreignant en termes d'atténuation. A cela deux raisons. Tout d'abord, les émissions anthropiques de GES depuis 2007 n'ont pas suivi la trajectoire du scénario le plus astreignant du 4^e RE, si bien qu'en 2013 le taux réel de CO₂ dans l'atmosphère était supérieur au taux du scénario le plus astreignant du 4^e RE ; il fallait donc compenser le retard pris. Ensuite et surtout, le scénario RCP2,6 du 5^e RE vise une stabilisation de la température mondiale à 1,6°C au dessus de la température pré-industrielle, centre d'un « intervalle probable » [0,9°C ; 2,3°C]²²³ ; alors que le scénario le plus astreignant du 4^e rapport visait 2,3°C, avec pour « intervalle probable » [1,6°C ; 3,4°C]²²⁴.

Quant au *facteur 2*, le Résumé technique de la contribution du GT1²²⁵, publié en 2013, pourrait sembler en constituer un appui : « Selon le scénario RCP2,6 (le plus exigeant du Ve rapport), les modèles prévoient une réduction moyenne des émissions de 50 % (14 à 96 %) d'ici 2050 par rapport aux niveaux de 1990 ». Dans le RID du rapport de synthèse, une autre fourchette de réduction est donnée : « Selon les scénarios d'atténuation conduisant en 2100 à des concentra-

223 Voir le rapport de synthèse intégral du 5^e RE. Tableau 2.1, page 65.

224 Voir le rapport de synthèse intégral du 4^e RE. Tableau 3.1, page 45.

225 Page 94.

tions atmosphériques d'environ 450 ppm eqCO_2 ²²⁶ ou moins, il est probable que le réchauffement sera maintenu durant le XXI^e siècle à moins de 2 °C par rapport aux niveaux préindustriels. Les scénarios visant ces concentrations d'ici 2100 se caractérisent par une réduction mondiale de 40 à 70 % des émissions anthropiques de GES entre 2010 et 2050, et par des émissions presque nulles, voire des émissions négatives en 2100 ». ²²⁷

Tout d'abord notons que le RID du rapport de synthèse, qui est de la plus haute importance politique, opère une approximation en citant des scénarios d'atténuation de ce 5^e RE pour lesquels « il est probable que le réchauffement sera maintenu durant le XXI^e siècle à moins de 2 °C par rapport aux niveaux préindustriels ». En effet, les scénarios RCP2,6, lesquels sont les plus exigeants du 5^e RE, ont pour 'intervalle probable' [0,9°C ; 2,3°C].

Il est par ailleurs notable que, associés au scénario RCP2,6, deux intervalles distincts de réduction des émissions anthropiques de GES sont donnés dans le 5^e RE. Mais il n'y a là aucune contradiction. En effet, l'intervalle 14% à 96% (RT du GT1) couvre les résultats produits par l'ensemble des modèles climatiques utilisés pour ce scénario RCP2,6, alors que l'intervalle 40% à 70% (RID du rapport de synthèse) est un intervalle de confiance auquel est associé la probabilité $p=0,9$, soit 90 %. En d'autres termes, pour obtenir le scénario RCP2.6, selon le GIEC il y a 5 % de « chance » qu'il faille une réduction supérieure à 70 %, et 5 % de « chance » qu'une réduction de moins de 40 % suffisent.

Finalement, un lecteur profane pourrait éventuellement trouver un point d'appui au *facteur 2* dans le RT de ce 5^e RE ou encore dans le RID du rapport de synthèse. Mais, cela reposerait sur une double incompréhension. La première consécutive à des formulations peu lisibles et peu adroites (ou au contraire très adroites?) de ces résumés, voire en outre à une erreur du RID du rapport de synthèse. La seconde résulterait d'une absence de connaissance de l'importance de *Reste causal* associé aux modèles et aux scénarios climatiques.

226 Dans le 3^e RE, 450ppm apparaissait déjà pour le scénario le plus astreignant. Mais il s'agissait de la concentration du seul CO_2 , ce qui était nettement moins ambitieux que dans ce 5^e RE, où il s'agit d'une concentration de 450ppm équivalent CO_2 .

227 RID du rapport de synthèse (fr) du 5^e RE, page 21.

III.1.1.15 - Octobre 2014, Jean Jouzel

Le 14 octobre 2014, Jean Jouzel fit une présentation de son livre *Le défi climatique*. Steve Rivière en publia un compte-rendu²²⁸ où il présente l'auteur en tant que *climatologue* et *expert du GIEC*. Un passage de ce compte-rendu porte sur le vote en première lecture par les députés d'un projet de loi qui, entre autres choses, fixait le *facteur 4* comme objectif national : « Il (Jean Jouzel) se félicite du vote à l'Assemblée nationale de la loi sur la transition énergétique. Jouzel est content d'y voir figurer le « facteur 4 » (...). Malgré tout, le glaciologue se veut pragmatique : « Cette loi est certes une avancée mais le problème reste sa mise en œuvre concrète » ».

La légitimité de scientifique et d'expert du GIEC de Jean Jouzel, rappelée par Steve Rivière, pouvait donner à penser que le problème qui restait était la « mise en œuvre concrète » de la loi », et que, par conséquent, le contenu de la loi en général et le *facteur 4* en particulier répondaient de façon satisfaisante au problème climatique. Cependant, nous n'avons pas accès à l'ensemble du propos tenu par J. Jouzel ce 14 octobre, si bien qu'une réduction de son propos pourrait être ici la cause de ce compte-rendu qui pouvait induire le lecteur en erreur.

Pour conclure, s'ajoutant aux extraits d'écrits que nous avons reproduits, nous avons personnellement assisté à diverses interventions orales où le climatologue promouvait le *facteur 2*. Mais nous aurions tort de penser que Jean Jouzel a été le seul scientifique à promouvoir le *facteur 2* et le *facteur 4*. Nous verrons plus loin que d'autres, dont d'éminents climatologues, ont fait de même. Mais l'exemple de Jean Jouzel, vice-président du GT1 du GIEC lors du cycle du 5^e RE, est particulièrement intéressant en raison du rôle qu'il a pu jouer en France dans la relation science-expertise-politique durant toute la période où le *facteur 2* était au cœur de la communication et de l'engagement international de l'État français.

228 Article intitulé *Pour le climatologue Jean Jouzel, « un autre mode de développement est possible »* et publié sur Haut Courant, site d'information en ligne des étudiants du M2 Métiers du journalisme de Montpellier. <http://hautcourant.com/Pour-le-climatologue-Jean-Jouzel,1946/>. Vu le 16 avril 2022.

III.1.1.16 - Loi n° 2015-992 du 17 août 2015 relative à la transition énergétique pour la croissance verte

« Art. L. 100-4.-I. -La politique énergétique nationale a pour objectifs : 1° De réduire les émissions de gaz à effet de serre de 40 % entre 1990 et 2030 et de diviser par quatre les émissions de gaz à effet de serre entre 1990 et 2050. »²²⁹

Cette fois-ci le *facteur 4*, en tant qu'objectif national, est inscrit noir sur blanc dans la loi. Nous étions alors à moins de quatre mois de la COP21, organisée à Paris par la France.

III.1.1.17 – L'abandon du facteur 2 au bénéfice de l'objectif de neutralité carbone

Finalement, nous l'avons vu section II.3.3.5, l'objectif du *facteur 2* est abandonné par L'union européenne, le G7, la France, etc., à la fin des années 2010 au bénéfice de la *neutralité carbone en 2050*. Il n'a pas eu, sinon peu, de traduction politique concrète et ne fut jamais repris dans les conclusions des COPs de la CCNUCC.

Tableau chronologique

1990	1 ^{er} RE du GIEC, un scénario passe par le <i>facteur 2</i> mais atteint 520ppm de CO ²
1995	2 ^e RE, le scénario le plus astreignant passe par une réduction de 30 % en 2050
2001	3 ^e RE, le scénario le plus astreignant passe par une réduction de 38 % en 2050
2003	Premier ministre français devant l'AG du GIEC, promotion du <i>facteur 2</i>
2004	Engagement du Ministre français de l'écologie et du développement durable
2005	Loi française d'engagement international en faveur du <i>facteur 2</i>
2007	4 ^e RE du GIEC, un scénario est plus ambitieux que le <i>facteur 2</i>
2008	Engagement du G8 derrière le <i>facteur 2</i>
2013-2014	5 ^e RE, selon le scénario le plus astreignant, la réduction des émissions en 2050

²²⁹ <https://www.legifrance.gouv.fr/jorf/id/JORFTEXT000031044385>

	se situe dans l'intervalle [40 % ; 70 %] de probabilité p=0,9
2015	Loi française fixant le <i>facteur 4</i> comme objectif national
2018	Rapport spécial 1,5°C du GIEC dont les scénarios les plus astreignants passent par la neutralité carbone (ici celle du seul CO ₂) vers 2050
2019	Loi française substituant la neutralité carbone au <i>facteur 4</i>

III.1.2 – Retour sur le 4^e rapport d'évaluation du GIEC

Nous proposons un focus sur le 4^e RE du GIEC, car nous y trouvons deux passages qui s'offrent comme support au *facteur 2*, deux passages qui méritent une analyse approfondie du point de vue des relations sciences et politiques.

L'un de ces passages était utilisé comme support au *facteur 2* par des scientifiques d'Inde engagés dans une action militante internationale pour le climat, dans le cadre du Forum mondial sciences et démocratie (FMSD) auquel nous participions. Suite à nos échanges, ces derniers ont abandonné l'objectif du *facteur 2*.

III.1.2.1 – Le Résumé technique du GT3

Le passage sur lequel s'appuyaient des collègues indiens pour justifier le *facteur 2* a déjà été présenté dans le sous-chapitre précédent, il se situe dans le Résumé technique de la contribution du GT3. Nous en rappelons les termes « *Dans la majorité des scénarios liés à la catégorie de stabilisation la plus astreignante (I), il est indispensable que les émissions déclinent à partir de 2015 et poursuivent leur baisse pour aboutir à moins de 50 % des émissions actuelles vers 2050* ». ²³⁰ Ce passage, cet appui au *facteur 2*, appelle deux commentaires :

230 Technical Summary / Issues related to mitigation in the long-term context / Stabilization scenarios. P.38-40.

https://archive.ipcc.ch/publications_and_data/ar4/wg3/en/tssts-ts-3-2-stabilization-scenarios.html

III.1.2.1.1 - Indispensable à quoi ?

Certes, nous y trouvons le terme « indispensable ». Cependant, la lecture du 4^e RE montre que selon celui-ci atteindre l'objectif *facteur 2*, est indispensable pour, sous certaines conditions, maintenir le réchauffement climatique dans la fourchette [2°C ; 2,4°C], et rien dans ce 4^e RE ne laisse entendre que cette fourchette serait politiquement satisfaisante, d'ailleurs un tel avis sortirait de la compétence du GIEC.

En outre, l'extrait ci-dessus du RT qui s'offre comme support au facteur 2 est suivi, deux pages plus bas dans le texte, par un propos qui présente l'édulcoration du risque par les scénarios : « *Les résultats d'études explorant l'effet des rétroactions du cycle du carbone et du climat indiquent que les niveaux de concentration susmentionnés et le réchauffement associé d'un scénario d'émissions donné pourraient être sous-estimés.* »²³¹ (VOA²³²). Si bien que, selon le GIEC, pour un profil d'émissions donné (passant par le facteur 2) le réchauffement pourrait in fine être supérieur à ce que prévoit les scénarios de ce 3^e RE.

III.1.2.1.2 - Quelques glissements et ambiguïtés sémantiques

Dans le RT de la contribution du GT3 du 4^e RE, la table TS.2 ci-dessous se situe à proximité de l'extrait qui nous occupe. Or cette table entre en contradiction avec cet extrait.

Table TS.2²³³ : Classification of recent (Post-Third Assessment Report) stabilization scenarios according to different stabilization targets and alternative stabilization metrics

Catégorie	Forçage radiatif (W/m ²)	Concentration en CO ₂ (ppm)	Concentration en eq-CO ₂ (ppm)	Augmentation de la température moyenne globale à l'équilibre par rapport à l'ère préindustrielle, en utilisant "la meilleure estimation" de la sensibili-	Année du maximum des émissions de CO ₂	Changement des émissions globales de CO ₂ en 2050 (% par rapport aux	No m br e de scé
-----------	--------------------------------------	--	---	---	---	---	------------------

²³¹ RT, GT3, RE4, page 42.

²³² « *Results from studies exploring the effect of carbon cycle and climate feedbacks indicate that the above-mentioned concentration levels and the associated warming of a given emissions scenario might be an underestimate.* ».

²³³ RT, GT3, 4^e RE, Page 39.

	Température climatique ^{a)} (°C)				Émissions en 2000)		na rio s év a- lué s
I	2.5-3.0	350-400	445-490	2.0-2.4	2000 - 2015	-85 to -50	6
II	3.0-3.5	400-440	490-535	2.4-2.8	2000 - 2020	-60 to -30	18
III	3.5-4.0	440-485	535-590	2.8-3.2	2010 - 2030	-30 to +5	21
IV	4.0-5.0	485-570	590-710	3.2-4.0	2020 - 2060	+10 to +60	11 8
V	5.0-6.0	570-660	710-855	4.0-4.9	2050 - 2080	+25 to +85	9
VI	6.0-7.5	660-790	855-1130	4.9-6.1	2060 - 2090	+90 to +140	5
Total							17 7

a. Notons que la température globale moyenne à l'équilibre se distingue de la température globale moyenne en 2100 du fait de l'inertie du système climatique.

En effet, selon cette table, l'ensemble, et non pas seulement une majorité des scénarios liés à la catégorie de stabilisation la plus astreignante (I), passent en 2050 par une réduction des émissions au moins égale à 50 % ; plus précisément par une réduction située entre 50 % et 85 %. Certes, ce qui est vrai pour une totalité l'est encore pour une majorité, ainsi selon la logique formelle la phrase en question ne serait pas erronée ; mais quel lecteur de ce RT aura une telle lecture ? Quel lecteur pourra supposer que derrière cette majorité de scénarios devant atteindre au moins 50 % de réduction en 2050 se trouve en fait une information plus lourde, porteuse d'un plus haut niveau d'exigence, à savoir la totalité des scénarios devant atteindre au moins 50 % de réduction ; et de plus une réduction située entre 50 % et 85 %, ce qui correspond à un facteur de réduction situé entre un minimum égal à 2 et un maximum proche de 7 (division par près de 7 des émissions), ce qui nous éloigne très nettement du facteur 2.

III.1.2.2 - Le rapport intégral du GT3

Dès la contribution intégrale du GT3, un support au facteur 2 était présent ; cela dans le chapitre 3 intitulé *Questions relatives au long terme dans le contexte de l'atténuation*. Ce support était

basé, ici encore, sur une synthèse non fidèle de la table TS.2 reproduite ci-dessus, mais une synthèse différente de celle du RT, y compris sur le fond. En effet, nous y lisons : « *Les scénarios les plus stricts (stabilisation à 445-490 ppm équivalent CO₂) pourraient limiter l'augmentation de la température moyenne de la planète à l'équilibre à 2-2,4°C au-dessus du niveau préindustriel, ce qui suppose que les émissions (...) se situent à environ 50% des niveaux actuels d'ici 2050* »²³⁴. (VOA²³⁵). Ici, contrairement à ce qu'affirme le RT, le propos concerne tous les scénarios, et non pas seulement une majorité ; quant à la contrainte affichée, elle est « d'environ 50 % » et non pas « d'au moins 50 % » ni située dans l'intervalle [50 % ; 85 %].

Toutefois, quelques lignes plus bas se présentait un commentaire prudent : « *Le risque de rétroactions climatiques n'est généralement pas pris en compte dans l'analyse ci-dessus. Les rétroactions entre le cycle du carbone et le changement climatique influent sur l'atténuation requise pour un niveau de stabilisation de la concentration de CO₂ dans l'atmosphère. (...) Par conséquent, les réductions d'émissions nécessaires pour atteindre un niveau de stabilisation particulier, indiquées dans les études d'atténuation évaluées ici, pourraient être sous-estimées.* ». (VOA²³⁶).

III.1.2.4 - Conclusion

Nous trouvons dans ce 4^e RE deux passages, et seulement deux passages qui, pris hors de leur contexte, pouvaient servir de support au *facteur 2*. Ces deux passages sont situés respectivement dans le RT du GT3 et dans le rapport intégral du GT3. Ils sont formulés de telle manière qu'ils se contredisent mutuellement, et, aussi et surtout, ils résultent de glissements et d'ambiguïtés

234 Chapitre 3, page 5 (page 173 de l'ensemble du rapport).

235 « *The most stringent scenarios (stabilizing at 445–490 ppmv CO₂-equivalent) could limit global mean temperature increases to 2–2.4°C above the pre-industrial level, at equilibrium, requiring emissions to peak before 2015 and to be around 50% of current levels by 2050.* ».

236 « *The risk of climate feedbacks is generally not included in the above analysis. Feedbacks between the carbon cycle and climate change affect the required mitigation for a particular stabilization level of atmospheric CO₂ concentration. (...) Therefore, the emission reductions to meet a particular stabilization level reported in the mitigation studies assessed here might be underestimated.* ».

sémantiques et tendent à induire chez le lecteur une représentation édulcorée des risques présentés par le changement climatique.

III.1.3 - Diffusion et légitimation dans l'espace public

III.1.3.1 - Wikipédia : légitimation par un raisonnement simple posé sur une question complexe

Tenant de démontrer l'existence du *facteur 2*, le raisonnement abordé plus haut à propos de l'interview de Jean Jouzel de novembre 2000, a connu une certaine diffusion : les océans et continents absorbaient à la fin du XX^e siècle et au début du XXI^e la moitié des émissions anthropiques de CO₂, donc si nous réduisons ces dernières au niveau de 50 % de ce qu'elles étaient en 1990 ou en 2000, alors elles seraient totalement absorbées, d'où une stabilisation du taux de CO₂ atmosphérique (et de là l'objectif de *facteur 2*). C'est simple, accessible, propice à la communication. Mais cela reposait sur le postulat faux selon lequel le niveau d'absorption du CO₂ serait constant. D'ailleurs, les rapports du GIEC prennent en compte une baisse de l'absorption de CO₂ par la nature au fil du temps. C'est pourquoi, ses scénarios de stabilisation, qui étaient la règle du 2^e RE au 5^e RE, aboutissaient tous sur une situation où le CO₂ capté par la nature déclinait jusqu'à un niveau très bas.

Nous notons que le raisonnement faux, venant « démontrer » la solidité de l'objectif du *facteur 2*, était encore présent dans l'article en français de Wikipedia, *facteur 4*, à la date du 19 juillet 2021. Extrait : " *les émissions mondiales de tonnes d'équivalent carbone par an (...) ont atteint en valeur moyenne 7,2 milliards de tonnes entre 2000 et 2005. L'inertie thermique des océans et les phénomènes naturels de régulation permettent encore à la Terre de conserver des conditions propices à la vie. C'est ainsi qu'elle absorbe par le biais des océans de l'ordre de **2 milliards** de tonnes d'équivalent carbone et environ **1,7 milliard** de tonnes supplémentaires au moyen de la biosphère continentale. Mais l'écart entre émission anthropogénique et absorption naturelle est devenu trop important : actuellement, plus de **trois milliards et demi** de tonnes*

*d'équivalent carbone ne sont plus absorbées et contribuent à augmenter fortement l'effet de serre. Conserver le même niveau de consommation énergétique sans subir de réchauffement climatique nécessiterait d'utiliser simultanément les capacités de régulation (puits naturels de carbone) de **deux planètes similaires à la Terre**. C'est pourquoi la solution admise par la plupart des décideurs est de **diviser par deux** les émissions mondiales totales **entre 1990 et 2050**. ».*

III.1.3.2 - La légitimation par des scientifiques

Le *facteur 2* ne peut guère et n'a jamais pu trouver d'appui du côté de la connaissance scientifique. Néanmoins, il trouva un appui du côté de personnalités scientifiques et d'institutions scientifiques. Nous avons vu que Jean Jouzel illustre cette affirmation. Ci-après, nous en verrons d'autres exemples, ainsi qu'une expression antinomique. Enfin, nous présenterons une initiative de 2017 soutenant le *facteur 2*, décliné en *facteur 4* pour l'Europe, au demeurant fertile en terme de diffusion de la conscience et de la mobilisation climatiques, au centre de laquelle nous retrouverons Jean Jouzel.

A. La Royal Society, 2009

Selon un rapport de la Royal Society britannique : « *Les parties à la CCNUCC devraient redoubler d'efforts pour atténuer le changement climatique et s'y adapter et, en particulier, convenir de réduire les émissions mondiales d'au moins 50 % par rapport aux niveaux de 1990 d'ici 2050 et davantage par la suite* ». ²³⁷ (VOA²³⁸).

Bien évidemment, la position de la Royale Society n'est pas fondée sur le raisonnement faux présenté précédemment, ce qu'illustre la chute de son propos « et davantage par la suite ».

B. Valérie Masson Delmotte, 2011

²³⁷ *Geoengineering the climate: science, governance and uncertainty*, rapport de la Royal Society, 2009, sous la direction de John Shepherd. (<https://royalsociety.org/topics-policy/publications/2009/geoengineering-climate/>).

²³⁸ « *Parties to the UNFCCC should make increased efforts towards mitigating and adapting to climate change and in particular to agreeing to global emissions reductions of at least 50% on 1990 levels by 2050 and more thereafter*. ».

En 2011, Valérie Masson-Delmotte écrivait : « Pour maintenir le réchauffement sous la barre des 2°C (ce fameux niveau de changement climatique « acceptable » défini par la Commission européenne), et retenue par les Nations-Unies à Copenhague, il faudrait réduire de plus de 50 % les émissions de gaz à effet de serre par rapport au niveau de 1990, d'ici à 2050 ». (Masson-Delmotte, 2011. Page 128).

V. Masson Delmotte ne fait pas ici sienne la barre des 2°C, mais la présente comme un objectif des politiques. Par contre elle affirme personnellement que pour réaliser cet objectif politique, « il faudrait réduire de plus de 50 %...», ce qui, pour un mathématicien ou un logicien signifie que le *facteur 2* est un condition nécessaire, mais ne dit rien en terme de condition suffisante ; si bien que selon le langage de la logique l'affirmation de V. Masson Delmotte est juste. Mais dans un langage plus courant, possiblement celui d'un bon nombre de lecteurs de l'ouvrage d'où est extraite cette phrase, celle-ci peut prendre un autre sens et signifier qu'à partir de 50 % de réduction en 2050 (50 % ou plus), le réchauffement devrait rester « sous la barre des 2°C ». Quoiqu'il en soit, nous pouvons interroger le choix de la climatologue experte du GIEC de mettre en avant la barre des 50 % en 2050 qui définit le *facteur 2*.

C. Rémy Prud'homme, économiste, professeur émérite à l'université Paris-XII

Le 14 mai 2010, sur le site du journal *Le Monde*, sous la plume de Rémy Prud'homme nous trouvons : « En réalité, le GIEC parle seulement de la nécessité (selon lui) d'une réduction par deux des émissions de gaz à effet de serre entre 1990 et 2050 »²³⁹.

D. Un point de vue antinomique, celui d'Hervé Le Treut

En 2013, Hervé Le Treut, Directeur de l'Institut Pierre-Simon Laplace²⁴⁰ (IPSL), auteur principal²⁴¹ du 4^e rapport d'évaluation du GIEC (2007) et membre de l'Académie des sciences (France), défendait dans la préface d'un ouvrage édité par l'ENS de la rue d'ULM, une division

239 https://www.lemonde.fr/idees/article/2010/05/14/les-deux-facteurs-4-par-remy-prud-homme_1351147_3232.html

240 L'IPSL regroupe huit laboratoires de recherche et deux équipes, sur les thèmes du changement climatique, des sciences de l'environnement et des sciences du système solaire.

241 Plus précisément, Hervé Le Treut est l'un des deux coordinateurs du chapitre 1 *Historical Overview of Climate Change Science* de la contribution du GT1 du 4^e RE.

par environ deux des émissions de dioxyde de carbone par rapport à la fin du XXe siècle. Cependant, il ne s'agissait nullement d'une promotion du *facteur 2*, puisqu'il considérait que ce niveau d'émission n'était pas un objectif pour 2050, mais une exigence qu'il aurait déjà fallu satisfaire, ce qu'il exprimait ainsi : « *Face à cette situation la nature n'attend pas. Alors qu'il faudrait maintenir les émissions de CO2 en dessous de 3 ou 4 milliards de tonnes de carbone par an, nous étions rendus à un peu moins de 7 milliards en fin de XXe siècle, et à 9 milliards environs aujourd'hui...* »²⁴²

Les trois climatologues français les plus en vue n'exprimaient donc pas le même point de vue à l'égard du *facteur 2*. Toutefois, Hervé Le Treut ne s'opposait pas directement au *facteur 2*, mais exprimait une position qui, de fait, venait non seulement en contradiction avec le *facteur 2* (entendu comme objectif visé pour 2050), mais donnait à celui-ci un caractère de nette insuffisance.

E. Appel pour un Pacte Finance-Climat européen²⁴³

Le 12 décembre 2017, un climatologue, Jean Jouzel, un économiste, Pierre Larroustourou, et 150 personnalités le plus souvent de « premier rang » - politiques, écologistes, syndicalistes, altermondialistes, artistes et scientifiques (notamment des économistes) -, la plupart françaises ou européennes, ont lancé l'*Appel pour un Pacte Finance-Climat européen*. Nous y trouvons le *facteur 2*, décliné en *facteur 4* à l'échelle de l'Union européenne : « (...) *il est fondamental que l'Europe fasse la preuve « grandeur nature » qu'il est possible de diviser par 4 ses émissions de gaz à effet de serre tout en créant massivement des emplois* » ; « *Diviser par 4 nos émissions, d'ici 2050 au plus tard ? Le chantier est colossal mais investir massivement dans les économies d'énergie et les énergies renouvelables pourrait conduire à « 900.000 créations d'emplois en France » selon les dernières prévisions de l'ADEME et plus de 6 millions d'emplois pour toute l'Europe... Voilà un bon moyen de faire reculer nettement le chômage et la précarité. Un bon moyen, donc, de réconcilier l'Europe avec les citoyens.* » ; « *Même avec un taux limité à 5 %, un impôt européen sur les bénéfiques permettrait de dégager chaque année plus de 100 milliards d'euros, une somme qui permettrait d'abonder le budget européen*

²⁴² Hervé Le Treut, préface de *Changement climatique : tous vulnérables ?* Auteur, Alexandre Magnan. Éditions Rue d'ULM. Collection sciences durables. P. 11.

²⁴³ <http://www.sauvonsleurope.eu/appel-pour-un-pacte-finance-climat-europeen/> vu le 16 décembre 2021. Il ne s'agit pas du site initial de l'appel, ce dernier, visité en décembre 2017, est aujourd'hui inaccessible, fermé.

pour cofinancer le chantier « Facteur 4 » sur le territoire européen ». Le premier signataire, Jean Jouzel, était le seul climatologue engagé dans cette initiative. Il apportait une légitimité scientifique aux éléments physiques du changement climatique présentés dans le texte de l'appel ; parmi ceux-ci nous avons le *facteur quatre*. Parmi les signataires nous trouvons Jean-Pierre Raffarin, ancien Premier ministre qui avait défendu le *facteur 2* devant l'assemblée plénière du GIEC à Paris en février 2003, mais aussi bien d'autres personnalités politiques, telles que Pascal Lamy, ancien Directeur général de l'Organisation mondiale du commerce (OMC) et ancien Commissaire européen, Romano Prodi, ancien Président de la Commission européenne, ou encore Frederico Mayor, ancien Directeur général de l'UNESCO. Finalement cet *appel à la mobilisation européenne*, publié deux ans après la COP21, précéda d'un an la publication par le GIEC du *Rapport spécial sur un réchauffement planétaire de 1,5°C*, et de deux ans la proposition de Pacte vert de l'UE par la Commission européenne en décembre 2019, proposition qui inclut l'objectif de neutralité carbone en 2050 appliqué à la globalité des GES.

III.1.3.3 - La légitimation par des écologistes

A. L'association négaWatt

L'association

Le terme « négaWatt » quantifie une énergie consommée en moins, c'est-à-dire une économie d'énergie. Le scénario de l'association française négaWatt porte sur la sobriété et l'efficacité énergétiques ainsi que sur les énergies renouvelables. Créée en 2002, cette association milite en faveur de décisions politiques, de changements de comportement et de choix technologiques contribuant à la lutte contre le réchauffement climatique. Aussi, à travers son institut, l'association négaWatt propose des formations à destination des professionnels de l'énergie.

Durant la seconde moitié de la décennie 2000, l'association négaWatt et son scénario du même nom étaient des références pour de nombreuses organisations militantes françaises, notamment altermondialistes et écologistes. Dans la même période, elle avait signé avec la composante française de l'ONG World Wide Fund for Nature (WWF) « *une convention de partenariat axée*

principalement sur l'actualisation de la version 2006 du scénario »²⁴⁴. WWF France, par ailleurs, développait alors de nombreux « partenariats stratégiques » avec des entreprises multinationales (Crédit Agricole, IKEA, Carrefour, etc.)²⁴⁵.

Le facteur 4

Durant la seconde moitié des années 2000, l'association faisait la promotion du *facteur 4* pour la France, ce qu'illustre l'introduction de la version 2006 du scénario négaWatt²⁴⁶ dont voici un extrait : « *Faisant suite à “la maison qui brûle” de Johannesburg en 2002*²⁴⁷, l'objectif d'une division par quatre de nos émissions de gaz à effet de serre d'ici 2050 lancé au printemps 2003 par le Premier ministre de l'époque avait soulevé quelque espoir. C'est à ce moment et dans ce contexte que le scénario négaWatt a été imaginé et élaboré par les gens de terrain que nous sommes. Praticiens ou experts de longue date des multiples disciplines que recouvre le développement durable dans le domaine de l'énergie, nous avons souhaité montrer les conséquences pratiques de cet objectif et indiquer les voies possibles pour y parvenir.

Nous avons donc construit en 2003 sur ces bases un premier scénario à l'horizon 2050, avec quelques étapes intermédiaires, en l'appliquant systématiquement à tous les domaines de la vie et de l'activité de notre société.

244 Vu sur le site de négaWatt, le 13/10/2010 : <http://www.negawatt.org/V7%20partenaires/partenaires.htm>.
Confer aussi (27/07/2021) https://www.negawatt.org/IMG/pdf/synthese_scenario-nw_2006v1.0.2.pdf

245 Vu le 13/10/2010 sur le site de WWF, « Nos partenariats stratégiques », : <http://www.wwf.fr/partenariats-entreprises/nos-partenariats-strategiques>. Confer en outre, vu le 27/07/2021 : <https://www.wwf.fr/qui-sommes-nous/entreprises-partenaires/liste>

246 Document de synthèse de l'association négaWatt, « Scénario négaWatt 2006 pour un avenir énergétique, sobre, efficace et renouvelable », Paris, 16 décembre 2006. Consultable sur le site Internet NégaWatt : <http://www.negawatt.org/telechargement/Scenario%20nW2006%20Synthese%20v1.0.2.pdf>.

247 Jacques Chirac, président de la République française, discours devant l'assemblée plénière du IV^e Sommet de la Terre, 2 septembre 2002, Johannesburg.

Pour être certains de ne pas nous tromper nous-mêmes, nous nous étions fixé deux règles : ne nous fonder que sur des faits établis et prouvés par l'expérience ; ne compter que sur les technologies aujourd'hui disponibles ou proches de l'être de manière certaine.

Le résultat était une bonne nouvelle : il est possible d'éviter le pire et de préserver l'avenir, de construire une société sobre, efficace et renouvelable, une société du "développement équilibré et soutenable". »

Ainsi, les auteurs du scénario négaWatt inscrivait leurs travaux dans le cadre du *facteur quatre* lancé par le chef du gouvernement français. De plus, ils n'interrogeaient guère ce facteur quatre, mais, au contraire, le considéraient comme suffisant pour résoudre le problème du dérèglement climatique, et plus encore pour « *construire une société sobre, efficace et renouvelable, une société du "développement équilibré et soutenable"* »²⁴⁸.

B. Pierre Radanne²⁴⁹

En 2006, Pierre Radanne, responsable de la commission Énergie du parti politique français *Les Verts*, affirmait : « *La stabilisation du réchauffement à un niveau de 2 °C supplémentaire exige de diviser par deux les émissions mondiales de gaz à effet de serre entre 2000 et 2050.* » (P. Radanne, 2006).

Pierre Radanne a occupé de nombreuses responsabilités et initié diverses structures. Dans les années 1970, il fonda avec Dominique Plancke le deuxième groupe des Amis de la Terre en France, à Lille, avant de fonder, dans cette même ville, la Maison de la nature et de l'environnement (MNE). Il a été Directeur adjoint du cabinet de Dominique Voynet, ministre de l'Aménagement du Territoire et de l'Environnement (1997-1998) et participa aux négociations de Kyoto (COP3, 1997). De janvier 1998 à janvier 2003, il était Président de l'Agence de l'environnement et de la maîtrise de l'énergie (ADEME, aujourd'hui rebaptisée Agence de la transition écologique). Puis de 2003 à 2005, au sein de la MIES, il conduisit une étude qui se conclut par un rapport sur le *facteur 4* et des scénarios de réduction des gaz à effet de serre de la France. En parallèle, en 2004, il fonda « *Futur Facteur 4* », un bureau d'études et de consulting spécialisé

248 Document de synthèse de l'association NégaWatt, « Scénario négaWatt 2006 pour un avenir énergétique sobre, efficace et renouvelable », op.cit.

249 Voir <https://www.babelio.com/auteur/Pierre-Radanne/99197> (vu le 26 mai 2021) et <https://ihedate.org/radanne-pierre> (vu le 27/07/2021).

dans l'environnement ; aussi il poursuivra une activité de consultant indépendant, d'expert auprès d'institutions et de conférencier. En 2006, il prit la responsabilité de la commission Énergie des Verts (rebaptisé Europe Écologie Les Verts (EELV) en 2010), qu'il conservera plus de dix ans. Enfin, de 2008 à 2018, il a été Président de l'association Dossiers et Débats pour le Développement Durable²⁵⁰ (4D), dont il est l'un des membres fondateurs.

III.1.4 - Quel impact politique ?

La portée du *facteur 2* dans l'espace public et politique est à analyser dans le cadre de la dynamique science et politique relative au changement climatique dont le GIEC constitue l'élément central. Ce *facteur 2* constituait un entre deux, entre le politique et le scientifique.

Dans le champ politique, il se situait au-delà de la réalité, c'est-à-dire au-delà des engagements et même au-delà des perspectives de nombreux gouvernements. Il constituait un horizon vers lequel certains gouvernements nationaux s'efforçaient d'amener l'ensemble des nations.

Dans le champ scientifique, il se trouvait en deçà de la réalité, c'est-à-dire que selon les connaissances scientifiques, pour *empêcher toute perturbation anthropique dangereuse du système climatique* (objectif de l'article 2 de la CCNUCC, 1992) le *facteur 2* n'était pas suffisant. S'en satisfaire, c'eût été prendre le risque majeur d'*effets néfastes au bien-être de l'humanité* (expression issue de la première conférence mondiale sur le climat, 1979²⁵¹).

Enfin, dans le champ de l'expertise intergouvernemental du GIEC située entre science et politique, jusqu'au premier semestre 2007 le *facteur 2* se situait au-delà des rapports du GIEC. En effet, il était alors plus ambitieux que chacun des scénarios publiés par le GIEC. Ce n'est qu'en juin 2007 que, avec la publication de la contribution du GT1 au 4^e RE, des scénarios présentés par le GIEC dépassèrent l'objectif du *facteur 2*. Le gouvernement français était particulièrement

²⁵⁰ <https://www.association4d.org/qui-sommes-nous/qui-sommes-nous-2/>

<https://www.association4d.org/blog/2018/09/25/nouvelle-presidence-de-4d/> (vu le 27/07/2021).

²⁵¹ Voir plus haut la section I.1.7.2 – Vers la création du GIEC.

engagé dans la promotion internationale du *facteur 2*, cela dès février 2003 avec l'intervention du Premier ministre devant l'Assemblée générale du GIEC, c'est-à-dire devant l'ensemble des représentants des gouvernements des nations. Le *facteur 2* a ainsi été utilisé dans les rapports de force internationaux dans l'objectif de renforcer l'ambition du consensus international face au changement climatique.

Lors de notre expérience militante des années 2000, qui a précédé nos activités de recherche, nous nous sommes heurtés à une difficulté. Le *facteur 2* était alors un repère auquel adhérait notre environnement militant. Cependant, ce repère cachait l'urgence qu'il y avait à agir. Toute tentative de dévoiler cette urgence en démontrant l'absence de base scientifique du *facteur 2* était alors vouée à l'échec, car elle rencontrait l'opposition de membres ou de sympathisants d'organisations (telles que négaWatt) qui avaient intégré ce *facteur 2* dans leur discours ou dans leurs études, et celle d'amis et de sympathisants de personnes physiques (telles que J. Jouzel) qui en faisaient la promotion. Ensuite, il y avait la crainte de rompre l'unité qui s'était créée derrière cet objectif, unité qui était confrontée aux climato-sceptiques. Enfin, il y avait la crainte d'alimenter un catastrophisme générateur de fatalisme.

Finalement, le *facteur 2* a pu servir à faire mouvement et a pu être un instrument pour renforcer les ambitions partagées par les nations visant à atténuer le changement climatique. Dans le même temps il a contribué à un déni de la profondeur et de l'urgence que présentait la question du changement climatique. Pour finir, la présentation erronées du *facteur 2* en tant qu'objectif satisfaisant selon la science, a constitué une quantification illusoire dont la propagation a été aidée par la quantophrénie ambiante et par une hypertrophie de la pensée réductionniste au détriment de la pensée du complexe. (Delepouve, 2011).

Chapitre 2 – Méthane. Des émissions naturelles hors scénario

Le présent chapitre constitue une pièce centrale de notre démonstration générale, sinon la pièce centrale. Il apporte une nouvelle preuve de l’assertion selon laquelle l’incertain, l’inconnu et l’imprévisible constituent une part qui ne peut être contournée de toute approche scientifique ou politique du devenir effectif du changement climatique au cours du XXI^e siècle. Cette assertion a déjà été démontré dans le chapitre 2 de la première partie, à l’aide de raisonnements logiques et d’approches générales. Ici, la démonstration est d’une autre nature. Elle repose directement sur des données scientifiques récentes portant sur quatre sources naturelles de méthane. Cette nouvelle démonstration pourrait sembler redondante, ce qu’elle est d’un point de vue logique. En fait, elle présente plusieurs apports en dehors d’une nouvelle preuve de l’assertion précitée. En premier lieu, elle enrichit et précise l’évaluation du risque climatique et de l’urgence de prévenir ce risque. En deuxième lieu, elle met en exergue la nécessité de surveiller ces quatre sources naturelles de méthane et d’amplifier notablement et sans attendre les recherches relatives à ces dernières. En troisième lieu, elle montre la nécessité de mettre un terme aux activités humaines pouvant perturber ces sources et entraîner une intensification de leurs émissions. Enfin, en quatrième lieu elle nourrit notre analyse des scénarios du GIEC. En effet, nous verrons que chacune de ces sources naturelles constitue un phénomène causal du changement climatique hautement chargé d’imprévisible et renvoyé dans le *Reste causal* associé aux scénarios climatiques quantifiés couvrant le XXI^e siècle.

En outre, ce chapitre rappelle la place du méthane dans l’histoire longue du climat, et précise son rôle dans le réchauffement en cours ; ce qui met en exergue l’importance des sources naturelles de ce GES.

III.2.1 – Généralités autour d'un puissant GES

III.2.1.1 – Un déterminant majeur du climat de l'éon Archéen

Selon le climatologue français Philippe Bousquet « *Les premiers âges de la Terre étaient, semble-t-il, chauds, alors que les reconstructions des concentrations de CO₂ indiquent que ce gaz ne pouvait pas, à lui seul, expliquer une température de surface élevée pour notre planète. (...) C'est donc dans un océan réducteur que des bactéries méthanogènes (plus exactement des archées) ont pu proliférer et produire de grandes quantités de méthane qui se sont répandues dans l'atmosphère. En l'absence d'oxygène et d'ozone, le temps de résidence du méthane dans l'atmosphère était beaucoup plus long qu'aujourd'hui et des concentrations de méthane élevées ont pu être atteintes fournissant ainsi un complément d'effet de serre à celui du CO₂.* »²⁵² Ce propos donne une première approche du climat terrestre entre un peu plus de 3,5 milliards d'années avant nos jours et 2,5 milliards d'années, c'est-à-dire durant le premier milliard d'années de l'existence d'une vie conséquente sur Terre. Pour une approche plus détaillée, intégrant un plus grand nombre de paramètres, le lecteur pourra consulter notre Annexe 1.

Puis vint le Grand événement d'oxygénation. A côté d'archées méthanogènes, l'océan abritait des populations de cyanobactéries qui produisaient massivement de l'oxygène par photosynthèse. Durant des centaines de millions d'années, cet oxygène était utilisé pour oxyder des matériaux des océans. Ceci étant accompli, il y a 2,5 milliards d'années l'oxygène produit s'est répandu dans l'eau de l'océan et dans l'atmosphère, ce qui sera appelé le Grand événement d'oxygénation. Philippe Bousquet résume la suite en ces termes : « *Cela a constitué une « double peine » pour le méthane :*

- *l'oxygène étant un poison pour les bactéries méthanogènes, leur territoire a fortement régressé et entraîné une forte réduction des émissions de méthane ;*

²⁵² Philippe Bousquet. *Méthane et climat*. Site *Le climat en questions*. 19 novembre 2013. <https://www.climat-en-questions.fr/reponse/mecanismes-devolution/methane-systeme-climatique-par-philippe-bousquet> Vu le 15/01/2022.

- après avoir oxydé les composés océaniques, l'oxygène produit a fini par envahir l'atmosphère, à produire de l'ozone et des radicaux hydroxyles qui ont (...) réduit fortement son temps de résidence (celui du méthane) dans l'atmosphère (seulement 10 ans aujourd'hui).

*Une chute brutale (à l'échelle climatique) des concentrations de méthane a eu lieu à ce moment-là et a probablement entraîné la première glaciation majeure de la Terre, il y a environ 2.3 milliard d'années. ».*²⁵³

Cette glaciation est survenue alors que le taux de dioxyde de carbone dans l'atmosphère était des dizaines de fois plus élevé que de nos jours. La raison en était un soleil plus froid : le flux d'énergie solaire vers la Terre augmente d'environ 7 % chaque milliard d'années ; il a donc augmenté de 17 % depuis cette première glaciation. Ce qui explique pourquoi de nos jours une concentration de GES très basse au regard des temps géologiques ne se traduit pas par une glaciation générale, et que l'augmentation actuelle de cette concentration, qui laisse aujourd'hui cette dernière à un niveau très bas relativement à l'échelle de l'histoire longue de la Terre, se traduit par un réchauffement qui présente un risque majeur d'emballement.

III.2.1.2 – Données atmosphériques d'un puissant GES

En tant que gaz à effet de serre, le méthane est beaucoup plus puissant que le gaz carbonique. La présence dans l'atmosphère à un instant 't' d'une molécule de CH₄ contribue 65 fois plus à l'effet de serre que la présence d'une molécule de CO₂²⁵⁴. Mais la molécule de méthane possède une durée moyenne de vie dans l'atmosphère qui est actuellement estimée, selon les auteurs, entre 9 et 12 ans. Philippe Bousquet écrit à ce sujet « *La quantité de méthane actuellement contenue dans l'atmosphère (B~ 4500 Tg²⁵⁵) et la somme des puits (L~500 Tg) implique que le*

²⁵³ Philippe Bousquet. Site *Le climat en questions*. Op. cit.

²⁵⁴ Ce rapport se déduit du tableau 2.1, ch.2, p. 141, *Contribution du groupe de travail I au quatrième rapport d'évaluation du GIEC*.

²⁵⁵ Nous rappelons qu'un Tg, un téragramme, vaut 10¹²g, c'est-à-dire 10⁶ tonnes.

temps de résidence du méthane dans l'atmosphère est d'environ 10 ans »²⁵⁶. Notons ici que ces chiffres sont largement approximatifs. Le 5^e RE (GT1) du GIEC évaluait, pour les années 2000, la somme des émissions de méthane à 600±80Tg et une augmentation annuelle de la quantité de méthane dans l'atmosphère de 6Tg²⁵⁷ ; par ailleurs il évaluait la quantité totale de méthane dans l'atmosphère à 4800±100Tg²⁵⁸. Toujours est-il que la durée moyenne de vie d'une molécule de méthane est très inférieure à celle d'une molécule de gaz carbonique. Cette dernière est parfois estimée à 125 ans (mais elle dépend de la capacité, qui évolue, de la nature et des océans à absorber ce gaz). Si bien que le rejet d'un gramme de méthane dans l'atmosphère présente, sur un siècle, un effet de serre moyen estimé entre 23²⁵⁹ et 30²⁶⁰ fois celui d'un gramme de CO₂²⁶¹.

III.2.1.3 - Sortie des rails

L'impact d'un GES ne dépend pas uniquement de la puissance d'effet de serre d'une molécule ou d'un gramme de ce GES, mais évidemment aussi de son taux de présence dans l'atmosphère. Le GIEC, dans le RID du GT1, 5^eRE, précise que « *la concentration du dioxyde de carbone a*

256 Philippe Bousquet. *La carte d'identité du méthane*. 19/11/2013.

<https://www.climat-en-questions.fr/reponse/mecanismes-devolution/methane-systeme-climatique-par-philippe-bousquet> Vu le 15/01/2022.

257 Pour ces deux derniers chiffres, voir le 4^e RE, contribution du GT1, section 6.3.3.4, page 510.

258 Section 6.3.3.3, page 509.

259 Nous trouvons cette évaluation minimale sur le site de la NAOO :

<https://oceanexplorer.noaa.gov/explorations/10chile/background/methane/methane.html> , vu le 20 novembre 2021.

260 Nous trouvons cette évaluation maximale sur le site *Le climat en question*. Philippe Bousquet. *La carte d'identité du méthane*. Op. cit.

261 Le calcul se concluant par ce nombre prend en compte le rapport entre la masse d'un atome de CO₂ et celle d'un atome de CH₄, soit 44/16, ainsi que le rapport entre l'effet cumulé sur 100 ans d'un gramme de méthane et l'effet cumulé sur 100 ans d'un gramme de dioxyde de carbone. La formule est 44/16.65.M/C, où M est la somme sur cent ans des restes annuels d'un gramme initial de méthane, et idem pour N mais pour un gramme initial de dioxyde de carbone. M= 1+q+q²+ ... + q⁹⁹ où q est situé dans [8/9;11/12] ; idem pour C mais avec q situé vers 124/125.

augmenté de 40 % depuis l'époque préindustrielle »²⁶² et celle du méthane « d'environ 150 % »²⁶³. Cependant, pour faire un point sur le stade actuel du changement climatique et en saisir l'ampleur, plutôt que de faire une comparaison entre les taux actuels de GES et les taux du début de l'ère industrielle, il vaut mieux opérer un changement d'échelle de référence et s'élever au-delà du dernier stade de l'histoire humaine pour se situer par rapport à la dernière période de l'histoire du système Terre, c'est-à-dire par rapport au Quaternaire. Concrètement, le gaz carbonique et le méthane sont aujourd'hui présents dans l'atmosphère à des niveaux largement plus élevés que durant les 800 000 ans qui ont précédé le XX^e siècle. Selon le 5^e RE du GIEC, « les variations passées des concentrations de gaz à effet de serre dans l'atmosphère sont déterminées avec un degré de confiance très élevé grâce aux carottes de glace polaire. Depuis le quatrième Rapport d'évaluation, ces relevés se sont étendus de 650 000 à 800 000 années »²⁶⁴. Durant ces 800 000 ans, le CO₂ avait fluctué entre 180 et 300ppm. Il atteignait environ 410ppm²⁶⁵ en 2019, soit un dépassement de près de la totalité de l'amplitude de la fluctuation plurimillénaire. Quant au CH₄, il fluctuait entre 400 et 700ppb²⁶⁶ durant ces 800 000 ans et atteignait environ 1866ppb²⁶⁷ en 2019, soit un dépassement de près de quatre fois l'amplitude de la fluctuation plurimillénaire.

262 GIEC, *op.cit.*, p.11.

263 GIEC, *op.cit.*, p.11.

264 Résumé technique du GT1, section R.T.2.8, page 50.

265 Voir RID du GT1, 6^e RE, section A.1.1, p.5.

266 ppb : parties par milliard (le « b » vient du mot anglais billion).

267 Voir RID du GT1, 6^e RE, section A.1.1, p.5.

III.2.1.4 - Poids du méthane dans le surplus anthropique de gaz à effet de serre

Nous venons de voir que le taux de méthane dans l'atmosphère était, en 2019, de l'ordre de 1866 ppb²⁶⁸, c'est à dire de 1,866 ppm. Quant au taux de CO₂, il était de l'ordre de 410 ppm²⁶⁹. Or le méthane est, en terme d'effet de serre par molécule, 65 fois plus puissant que le CO₂ ; si bien que l'effet de serre²⁷⁰ dû au méthane équivaut à 1,866x65 ppm de CO₂, soit environ 121ppm. Finalement, en 2015 le poids du méthane dans l'effet de serre était équivalent à 121/410 fois le poids du CO₂, soit environ 30 %.

Voyons maintenant la contribution du méthane au réchauffement climatique depuis le début de l'ère industrielle (précisément depuis 1750), relativement à la contribution du dioxyde de carbone. Pour ce faire, nous comparerons l'augmentation du taux de méthane dans l'atmosphère depuis 1750 à celle du dioxyde de carbone. En 1750, le taux de méthane dans l'atmosphère était d'environ 722ppb²⁷¹ ; en 2019 il était de l'ordre de 1866ppb. Ce taux a donc connu une augmentation de l'ordre de 1,144ppm entre 1750 et 2019. Ce chiffre est à multiplier par 65 pour obtenir l'équivalent CO₂ : soit environ 74ppm. Quant au taux de CO₂, il est passé sur la même période d'environ 280ppm²⁷² à environ 410ppm, soit une augmentation de l'ordre de 130ppm. Finalement, en 2019 la part du méthane dans l'augmentation de l'effet de serre depuis 1750 est égale à environ 74/130 fois la part du CO₂ dans cette augmentation, c'est-à-dire de l'ordre de 57 % de la part du CO₂. Ce pourcentage qui mesure le rapport des contributions respectives du méthane et du dioxyde de carbone au réchauffement climatique actuel (lequel est égal au rapport de leurs contributions respectives au surplus anthropique d'effet de serre) est donc presque égal au double du précédent pourcentage, qui lui mesurait le rapport des contributions respectives du méthane et du dioxyde de carbone à l'ensemble de l'effet de serre. Nous notons que des don-

268 Voir 6^e RE, GT1, Rapport intégral (version adoptée mais édition provisoire du), Annexe 3, Table AIII.1a, page 3774.

269 Idem à la note précédente.

270 Il s'agit ici de l'effet de serre de l'instant, et non pas de l'effet de serre moyen sur un siècle dû à l'émission d'une molécule de GES.

271 722±25ppb, selon le 5^eRE, chapitre 2, section 2.2.1.1.2, p.167.

272 4^e RE, GT1, rapport complet, section 2.3.1, p.137

nées du 5^e RE²⁷³ permettent, grâce à un calcul élémentaire (une simple division), de trouver une valeur de ce rapport, à savoir 53,3 %, qui est proche de notre résultat.

Remarque. La somme des contributions du dioxyde de carbone et du méthane au forçage radiatif total d'origine anthropique entre le début de l'ère industrielle et aujourd'hui est de l'ordre de 80 %²⁷⁴ + 45 %²⁷⁵, soit de l'ordre de 125 %. A ce chiffre nous pouvons ajouter les contributions des autres GES émis par l'activité humaine, à savoir le protoxyde d'azote (N₂O), l'ozone (O₃) de la troposphère et les halocarbures. Ce dépassement du niveau 100 % peut sembler absurde, mais ce n'est pas le cas. En effet, d'autres composantes d'origine anthropique de l'atmosphère, notamment les aérosols, ont un forçage radiatif négatif ; ils refroidissent l'atmosphère.

III.2.1.5 - Rebond inattendu

III.2.1.5.1 - Les sauts de 2020 et de 2021

Le 7 avril 2021, l'agence de recherche étasunienne la National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA) publia une information titrée *Malgré les arrêts d'activité pour cause de pandémie, le dioxyde de carbone et le méthane ont fait un bond en 2020*²⁷⁶. Nous en reproduisons ci-après, au sujet du méthane, quelques extraits. Auparavant, nous notons que, concernant le dioxyde de carbone, qui n'est pas le cœur de notre objet d'étude, et contrairement au mé-

273 Page 13 du RID. Nous notons que le forçage radiatif du surplus de méthane prend ici en compte « les changements de concentration d'ozone et de vapeur d'eau stratosphériques dus aux émissions de CH₄ ». Sinon, nous aurions un forçage réduit de moitié (0,48W/m² au lieu de 0,97W/m²).

274 Chiffre issu d'un croisement de sources :

- Journal du CNRS, 12 décembre 2016, <https://lejournel.cnrs.fr/articles/le-methane-en-augmentation-dans-latmosphere> . Ici le chiffre 80 % est donné.

- 5^e RE, GT1, RID, page13. La division de deux données de cette page donne 79,5 %.

275 Ce chiffre est un arrondi commun à deux produits, le premier 80x0,57, le second 79,5X0,533.

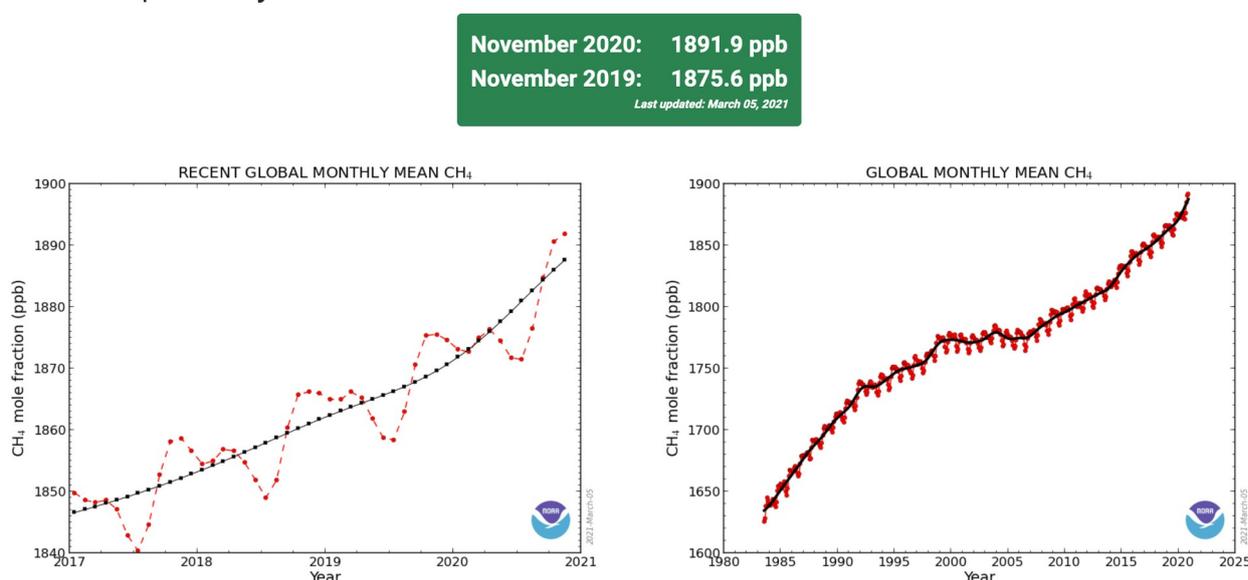
276 <https://research.noaa.gov/article/ArtMID/587/ArticleID/2742/Despite-pandemic-shutdowns-carbon-dioxide-and-methane-surged-in-2020> , vu le 20/11/2021.

thane, la baisse d'activité de 2020 ne pouvait pas se traduire de façon très significative sur l'évolution du taux de ce GES dans l'atmosphère, en raison de la grandeur de la durée moyenne de vie de ce dernier dans l'atmosphère (voir notre Annexe 2. *Réactivité du méthane. Inertie du dioxyde de carbone*).

Extraits de l'article de la NOAA :

- « *Ci-dessous, ces graphiques illustrent l'augmentation de la concentration mondiale moyenne mensuelle de méthane dans l'atmosphérique, calculée à partir des mesures recueillies par le réseau mondial de référence des gaz à effet de serre de la NOAA.* » (VOA²⁷⁷)

Global CH₄ Monthly Means



- « *L'analyse préliminaire de la NOAA a montré que l'augmentation annuelle du méthane atmosphérique pour 2020 était de 14,7 parties par milliard (ppb), ce qui constitue la plus forte augmentation annuelle enregistrée depuis le début des mesures systématiques en 1983.* » (VOA²⁷⁸). Le chiffre définitif donné par la NOAA pour l'année 2020 sera finalement supérieur :

277 « *Below, These graphs depict the increase in the monthly mean global atmospheric burden of methane as analyzed from measurements collected by NOAA's Global Greenhouse Gas Reference Network.* »

278 « *NOAA's preliminary analysis showed the annual increase in atmospheric methane for 2020 was 14.7 parts per billion (ppb), which is the largest annual increase recorded since systematic measurements began in 1983.* »

15,27ppb²⁷⁹ ; quant au précédent record, il datait de 1991 et atteignait 14,06ppb. Enfin, toujours selon la NOAA, l'augmentation du méthane atmosphérique de l'année 2021 constitua à nouveau un record, 18,3ppb²⁸⁰, soit plus de 3ppb au-dessus du record de l'année 2020.

- « *L'analyse préliminaire de la composition isotopique du carbone du méthane dans les échantillons d'air de la NOAA, effectuée par l'Institut de recherche arctique et alpine de l'université du Colorado, indique qu'il est probable que le principal facteur de l'augmentation de la charge de méthane provient de sources biologiques de méthane, telles que les zones humides ou le bétail, plutôt que de sources thermogéniques.* » (VOA²⁸¹).

Nous notons que parmi le méthane d'origine biologique se trouve, à côté du méthane généré par les activités agricoles ou par les zones humides, le méthane émis par les quatre sources que nous étudierons ci-après : la fonte du pergélisol, la fonte d'hydrates de méthane, la fonte des calottes polaires et le vivant marin²⁸².

Quant au méthane thermogénique, il est issu de restes organiques (carbonés) situés à de grandes profondeurs sous le niveau du sol, là où règnent une pression et une forte chaleur terrestre nécessaire à la transformation de déchets organiques complexes générant l'hydrocarbure le plus simple, c'est-à-dire le CH₄.

Enfin il y a le méthane pyrogénique ou pyrogène, qui provient de la combustion incomplète de matière organique (incendie de forêts, de tourbières..., combustion de bio-énergie).

Ces trois catégories de sources d'émissions de méthane se distinguent entre elles par leur composition isotopique du carbone²⁸³, plus exactement à chacune d'elles correspond un

279 Voir https://gml.noaa.gov/ccgg/trends_ch4/

280 Voir https://gml.noaa.gov/ccgg/trends_ch4/

281 « *Preliminary analysis of carbon isotopic composition of methane in the NOAA air samples done by the Institute of Arctic and Alpine Research at the University of Colorado, indicates that it is likely that a primary driver of the increased methane burden comes from biological sources of methane such as wetlands or livestock rather than thermogenic sources* ».

282 Pour plus de précisions, voir par exemple le site de la NAOO :

<https://oceanexplorer.noaa.gov/explorations/10chile/background/methane/methane.html> , vu le 20-11-2021.

283 Voir le 5^e RE, GT1, rapport intégral, chapitre 6, section 6.3.3.2, p.508.

intervalle dans lequel se trouve le taux de carbone13 dans le carbone. Ainsi, dès lors que ce taux est connu pour un échantillon de méthane donné, nous avons une indication sur la nature de là ou des sources d'émissions, mais pas nécessairement une information complète. Par exemple, un taux peut nous assurer de la présence très majoritaire de sources biologiques, mais n'exclut pas une présence non marginale de sources thermogéniques ni une présence faible de sources pyrogènes.

III.2.1.5.2 – Depuis 2007

i. Un retour exponentiel

Les données, dont le tableau de cette sous-section, sont tirées de Etheridge et al. (1998, table2, p.15987), Nisbet et al. (2019) et du site de la NOAA (Carbon Cycles Greenhouse Gases²⁸⁴).

Le taux de méthane dans l'atmosphère a connu une augmentation soutenue du début des années 1960 jusqu'au début des années 1990 (avec un maximum de 14ppb en 1991), puis une croissance ralentie de 1992 à 1999 (en moyenne 5,1ppb/an), suivi d'un quasi-plateau de 2000 à 2006 (en moyenne +0,5ppb/an²⁸⁵, soit un niveau de croissance constamment dépassé depuis le début du XIXe siècle), avant un premier rebond de croissance entre 2007 et 2013 (en moyenne 5,7ppb/an), puis un deuxième rebond entre en 2014 et 2019 (en moyenne 9,2ppb/an). Enfin une nouvelle accélération survint en 2020 et 2021, après le record de 15,7ppb de 2020, l'année 2021 atteint 18,3ppb.

Années	ppb/an moyen
1960 - 1991	Soutenu avec un max de 14
1992 - 1999	5,1
2000-2006	0,5
2007-2013	5,7
2014-2019	9,2
2020-2021	17

ii. Des causes incertaines

²⁸⁴ https://gml.noaa.gov/ccgg/trends_ch4/

²⁸⁵ Voir 5° RE du GIEC, GT1, chapitre 2, p.165.

Les causes de cette hausse exponentielle de la concentration du méthane dans l'atmosphère depuis 2007 pourraient être de natures très diverses, soit une baisse de l'activité des puits de méthane (captation), soit une hausse de l'activité des sources (émissions), soit les deux ; c'est-à-dire concrètement, selon Nisbet et al. (2019), l'une, plusieurs ou l'ensemble des quatre causes suivantes :

a. une baisse de la capacité de l'atmosphère terrestre à briser les molécules de méthane et donc une augmentation de la durée de vie du méthane dans l'atmosphère, probablement en raison du réchauffement climatique lui-même ;

b. une augmentation des émissions anthropiques de méthane due au développement d'une agriculture intensive de pays d'Afrique ;

c. l'augmentation des émissions de zones humides tropicales ou subtropicales du fait d'un climat plus chaud et plus humide ;

d. la fonte du permafrost continental au Nord ou/et la désintégration d'hydrates de méthane du permafrost sous la Mer Arctique.

Quant aux sources de méthane qui ont contribué à l'augmentation de la concentration atmosphérique du méthane depuis 2020, selon la NOAA²⁸⁶, elles seraient essentiellement d'origine biologique, comme le sont toutes celles citées dans les 4 alinéas ci-dessus.

Enfin, se présentent des questions ouvertes, telles que celle posée par Nisbet et al. (2019, 9. Discussion, page 336) : « *Il est intéressant de noter que, bien qu'il puisse ne pas y avoir de lien de causalité commun, la croissance du méthane depuis 2007 et l'accélération de cette croissance depuis 2014 sont toutes deux parallèles aux augmentations d'un autre indicateur majeur du changement climatique, les taux de perte de glace dans l'Arctique et dans l'Antarctique occidentale.* ». (VOA²⁸⁷). Cette question ouverte de Nisbet et al. est à mettre en

286 <https://research.noaa.gov/article/ArtMID/587/ArticleID/2742/Despite-pandemic-shutdowns-carbon-dioxide-and-methane-surged-in-2020>, vu le 13/01/2022.

287 « *Interestingly, although there may be no common causal link, the methane growth since 2007 and accelerated growth since 2014, both parallel increases in another major indicator of climate change, the rates of ice loss from both the Arctic and West Antarctica* ».

regard, sans toutefois en tirer de conclusions hâtives, de l'article de Christiansen et al. (2021) *Carbon Emissions From the Edge of the Greenland Ice Sheet Reveal Subglacial Processes of Methane and Carbon Dioxide Turnover* dont voici des extraits du 'Résumé en langage ordinaire' : « Les zones humides et le dégel du permafrost sont considérés comme les principales sources d'émissions naturelles de méthane et de dioxyde de carbone dans l'Arctique. Cependant, de nouvelles découvertes montrent que ces gaz sont également émis en grande quantité par l'eau de fonte provenant du sous-sol de la calotte glaciaire du Groenland. (...). Nos mesures sur le terrain ont montré que les niveaux de méthane dans la cavité de sortie des glaciers sont jusqu'à 100 fois plus élevés que les niveaux de méthane (deux parties par million) dans l'atmosphère. Nos résultats montrent que ces gaz proviennent de processus biologiques sous la glace, et que le taux de libération dépend de la fonte du glacier. Notre étude (...) nous aidera à comprendre l'importance plus générale de cette source de GES pour la composition de l'atmosphère et sa rétroaction au changement climatique ». (VOA²⁸⁸). Ainsi, nous avons une cinquième cause éventuelle au rebond de la hausse du taux de méthane dans l'atmosphère. Enfin, face à la complexité du système Terre et aux limites des connaissances scientifiques, il peut sembler indispensable d'ajouter ici une catégorie causale complémentaire, c'est-à-dire le domaine de l'Inconnu inconnu ; ce qu'illustre la survenue de cette cinquième cause éventuelle ou encore la découverte, en 2014, des bactéries SAR11 méthanogènes.

III.2.1.5.3 - Les incertitudes

Une des difficultés rencontrées pour déterminer les causes de la croissance exponentielle de la concentration du méthane dans l'atmosphère depuis 2007 réside dans les lacunes ou incertitudes particulièrement importantes présentées dans la quantification des émissions des différentes sources et dans la répartition des émissions entre les différentes régions du globe. A ce sujet,

288 « *Wetlands and thawing permafrost are considered to be the primary sources of natural methane and carbon dioxide emissions in the Arctic. However, new discoveries show that these gases are also emitted in large quantities from the meltwater coming from under the Greenland Ice sheet. (...). Our field measurements showed that the levels of methane in the glacial outlet cavity are up 100 times higher than the background levels of methane (two parts per million) in the atmosphere. Our results show that these gases originate from biological processes under the ice, and that the release rate is controlled by the melting of the glacier. Our study (...) will help us to understand its broader relevance (of these GES source) for the atmospheric composition and its feedback to climate change.* ».

une publication²⁸⁹ de l'*Atlas mondial du carbone* s'appuyant sur des publications de recherche de 2020, met l'accent sur ces incertitudes et précise : « *Comme le nombre d'études est inégal et généralement faible, les incertitudes sont signalées entre parenthèses comme une fourchette entre les estimations minimales et maximales. Les incertitudes sont généralement de l'ordre de 30% de la moyenne pour un type donné d'émission de CH4 à l'échelle mondiale (moins pour les émissions anthropiques, plus pour les émissions naturelles). Les incertitudes peuvent augmenter jusqu'à 100% (ou plus) de la moyenne lorsqu'on examine le type d'émission de CH4 dans une région.* » (VOA²⁹⁰).

III.2.1.5.4 - Synthèse

En 2019, Nisbet et al. (2019) concluaient un article de recherche en des termes que nous reprenons ici.

Dans un premier temps, il y était question des causes éventuelles de l'augmentation du taux de méthane : « *Il est urgent de déterminer les facteurs à l'origine de l'augmentation récente du méthane : c'est même essentiel si l'on veut limiter le réchauffement climatique dans les limites de l'accord de Paris. Si les principales causes sont l'augmentation des émissions anthropiques, il faut les réduire. Si l'augmentation de la charge en méthane est due à une augmentation des émissions de sources naturelles, et s'il s'agit d'une rétroaction climatique - le réchauffement alimentant le réchauffement - alors il est urgent de réduire les émissions anthropiques, que nous pouvons contrôler. En revanche, si l'augmentation de la charge en méthane est due à une diminution de la capacité d'oxydation de l'atmosphère et qu'il s'agit d'une rétroaction climatique, alors les conséquences sont graves* ». (VOA²⁹¹).

289 <http://www.globalcarbonatlas.org/fr/CH4-emissions> , vu le 30/11/2021.

290 « *As the number of studies is uneven and generally small, uncertainties are reported in brackets as a range between the minimum and maximum estimates. Uncertainties are typically on the order of 30% of the mean for a given type of CH4 emission at a global scale (less for anthropogenic, more for natural). Uncertainties can increase up to 100% (or more) of the mean when looking at CH4 emission type in a region.* ».

291 « *The need to determine the factors behind the recent rise in methane is urgent: indeed, essential if global warming is to be limited within the Paris Agreement limits. If the main causes are increased anthropogenic emissions, they need to be reduced. If the increased methane burden is driven by increased emissions from natural sources, and if this is a climate feedback—the warming feeding the warming—then there is urgency to*

Puis le propos portait sur ce qu'il faudrait réaliser concrètement pour corriger la situation. *«Il est possible de réduire les émissions de méthane, en particulier celles provenant des combustibles fossiles, et cela aurait un impact rapide sur la présence mondiale de méthane dans l'atmosphère. Cela permet d'être optimiste, mais sans excès : le défi est de taille. Mais il n'y a pas de solution miracle unique : la recherche sur le méthane se heurte à de nombreuses frontières et la réalisation des objectifs de Paris exige des progrès de grande ampleur. Si l'on n'aborde pas ces questions et si l'on n'accorde pas davantage d'attention à la réduction des émissions de méthane, en particulier celles provenant des combustibles fossiles et de la combustion de la biomasse²⁹², le succès de l'accord de Paris pourra être compromis. » (VOA²⁹³).*

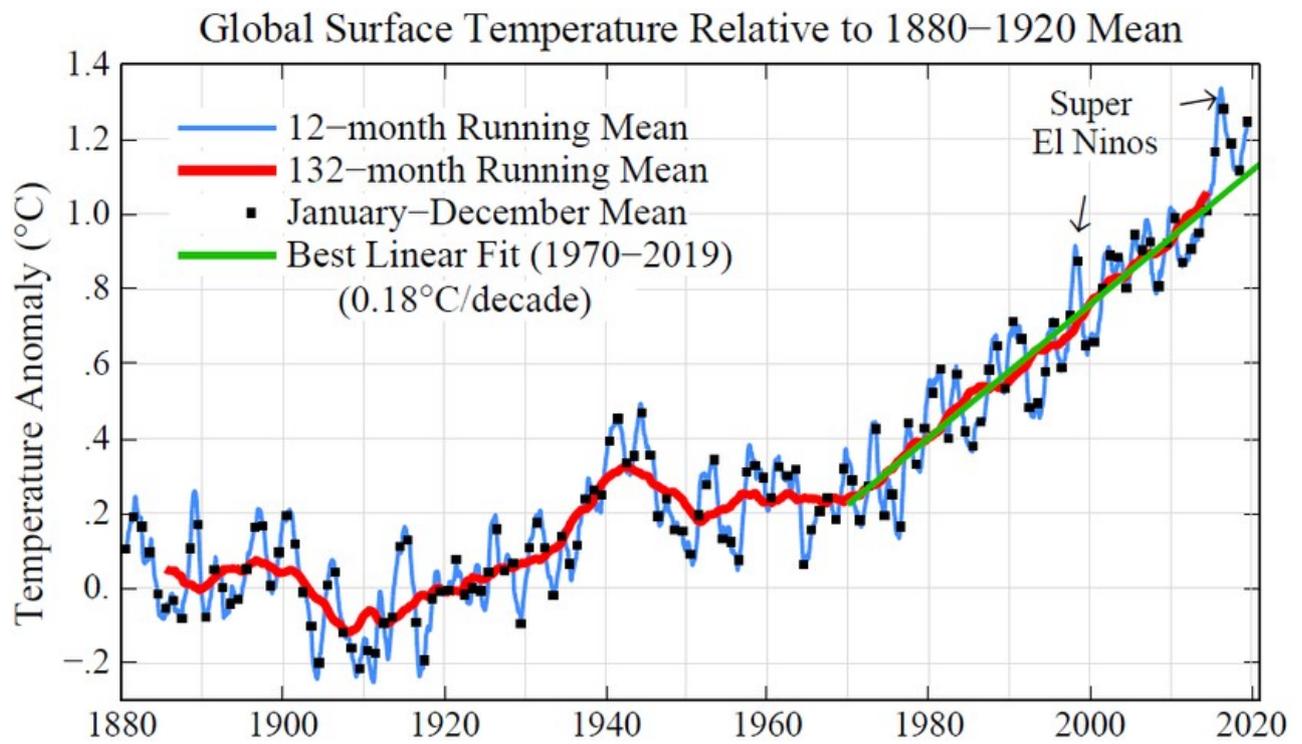
III.2.1.6 - 2014, un seuil climatique ?

Figure N : Anomalies de température globale par rapport à la période 1880-1920²⁹⁴. Source : NASA.

reduce anthropogenic emissions, which we can control. If, however, the increase in the methane burden is driven by a decline in the oxidative capacity of the atmosphere, and this is a climate feedback, then the implications are serious indeed. ».

292 En fait, il s'agit de la combustion incomplète de biomasse, pour l'essentielle lors d'incendies de forêts ou de tourbières et lors de l'utilisation du bois comme combustible domestique. Voir 5^e RE, GT1, section 6.3.3.2, p. 508-509.

293 *« Reducing methane emissions is feasible, especially from fossil fuel sources, and would have rapid impact on the global methane burden. This permits optimism but not complacency: the challenge is large. But there is no single silver bullet: there are many frontiers in methane research, and successfully meeting the Paris goals demands wide-ranging progress. Unless these questions are addressed, and much more attention paid to reducing methane emissions, especially from fossil fuels and biomass burning, the success of the Paris Agreement may be at risk. » .*



294 Figure issue de <https://global-climat.com/2020/01/16/temperature-mondiale-mise-a-jour-du-bilan-2019/> sur la base des données de la NASA : <https://climate.nasa.gov/vital-signs/global-temperature/>

Comme l'illustre la figure ci-dessus, l'année 2014 a connu un record absolu de température moyenne, depuis les premières mesures établies en 1880. Il en fut de même de l'année 2015, puis de l'année 2016. Ainsi, le record de température annuelle moyenne à la surface de la Terre a été battu trois années consécutives, 2014, 2015 et 2016 (année du record encore actuel). Depuis, et jusqu'au moins l'année 2022, c'est-à-dire durant neuf années consécutives, la température annuelle moyenne terrestre n'est jamais redescendue sous le niveau de 2014. Pour résumer, avant 2014 les températures avaient toujours été inférieures à celle de 2014 ; et après 2014 elles ont toujours été supérieures à celle de 2014. En ce sens il y aurait le climat d'avant 2014 et celui d'après 2014 ; les années à venir infirmeront ou confirmeront le constat selon lequel un seuil du réchauffement climatique aurait ainsi été franchi en 2014. Cependant, en termes de processus de bifurcation du système complexe que constitue le climat, ce constat d'un seuil franchi par un indicateur, la température terrestre moyenne annuelle (indicateur majeur s'il en est), n'est pas suffisant pour parler de seuil climatique. Par contre, le fait que la température moyenne annuelle ait atteint en 2014 un niveau record sans retour contribue ou pourrait contribuer à ce que la conscience du réchauffement climatique franchisse un seuil.

L'évolution de l'indicateur que constitue la température moyenne annuelle n'est pas suffisant pour conclure en l'existence du franchissement d'un seuil climatique. Il faudra donc étendre les observations à d'autres aspects du système climatique. Auparavant, nous allons regarder si une situation similaire de passage de seuil de température aurait déjà été rencontrée depuis le début des relevés de température à l'échelle mondiale en 1880. Sur la figure ci-dessus de la NASA, nous voyons qu'un record absolu donné n'était jamais immédiatement dépassé durant deux années consécutives. En d'autres termes, soit l'année suivant l'année N du record, soit la deuxième année située après cette année N, la température redescendait sous celle de l'année N. Cependant, à cela la figure ci-dessus présente une exception, celle de l'année 1938. En effet, il faudra attendre 1947 pour trouver une température sous le record de 1938. Ainsi le record de 1938 aurait été suivi de huit années consécutives sans redescendre sous ce record. Cependant la fiabilité des données climatiques relevées sur les océans durant la Seconde guerre mondiale est désormais questionnée : durant cette période les températures moyennes annuelles auraient été surestimées (Hansen et al., 2017, Appendix A3). Si bien qu'il est vraisemblable que le franchissement d'un seuil de température tel que celui effectué en 2014 soit inédit.

Nous abordons maintenant une tout autre question que pose la figure de la NASA. Elle porte sur la période de l'après-guerre. Sur cette figure, nous voyons que l'année 1947 ouvrit un plateau climatique de près de trois décennies. Il est maintenant connu que ce plateau résulte, pour l'essentiel, d'émissions anthropiques d'aérosols dans l'atmosphère. En augmentant l'effet albédo de l'atmosphère, ces aérosols avaient un effet refroidissant croissant qui compensait l'effet de l'augmentation de la concentration des GES. Puis vint la période où furent mises en place des politiques contre les émissions d'aérosols, en raison de leurs effets nocifs sur la santé et sur l'environnement ; ceci contribua, dans les années 1970, au retour de l'accroissement de la température terrestre.

Nous revenons maintenant à l'étude de l'hypothèse d'un seuil climatique franchi en 2014. L'année 2020, qui n'apparaît pas sur la figure ci-dessus (celle-ci mène jusque l'année 2019), a connu une température moyenne située très légèrement en dessous de celle de 2016, année du record absolu. Il est notable que si l'année 2016 est celle d'une pleine expression du phénomène El Niño, qui s'accompagne d'une élévation momentanée de la température terrestre, l'année 2020, au contraire, s'est terminée sous l'expression du phénomène La Niña, qui refroidit l'atmosphère, après avoir débuté sous l'expression de la fin d'une occurrence d'El Niño. Si bien que, si nous corrigeons les températures par une annulation théorique des conséquences sur ces dernières du phénomène *El Niño-Southern Oscillation* (ENSO), l'année 2020 pourrait être considérée comme plus chaude que l'année 2016.

Le 5^e RE du GIEC avait-il prévu le franchissement en 2014 d'un seuil de température ? Le texte de synthèse du 5^e RE (publié en 2014) précise « *Le changement de la température moyenne à la surface du globe pour la période 2016-2035 par rapport à 1986-2005 est semblable dans les quatre profils représentatifs d'évolution de concentration (RCP) et sera probablement compris entre 0,3 °C et 0,7 °C (degré de confiance moyen)* ». Or, vu les données de la figure ci-dessus, vu que l'année 2020 a été quasiment aussi chaude que l'année 2016 et vu que l'année 2021 a connu une température moyenne se situant aux environs de 1,1°C au-dessus de celle de la fin du

XIX^e siècle²⁹⁵, sur la période 2015-2021 la moyenne de la température annuelle mondiale s'est située 1,2°C au-dessus de celle de la fin du XIX^e siècle et donc 0,6°C au-dessus de celle de la période 1986-2005. Finalement, la période 2015-2021 se situe déjà vers la borne supérieure des prévisions de température moyenne faites par le 5^e RE pour la période 2016-2035. Il semble très probable que sur la période 2016-2035 la température moyenne se situera au-delà, voire bien au-delà, de l'intervalle 0,3°C – 0,7°C qui était probable selon le 5^e RE du GIEC.

Nous allons ici élargir le constat fait sur l'année 2014 à d'autres éléments que la température terrestre annuelle moyenne. Nous avons vu plus haut que cette année 2014 est aussi celle de l'entrée dans la deuxième phase du rebond de la concentration de méthane dans l'atmosphère. Cependant, n'allons pas en déduire que l'élévation du taux de méthane atmosphérique serait la seule et unique cause de l'élévation des température. Certes, l'augmentation du taux de CH₄ contribue à cette élévation de la température, mais elle ne peut suffire. Finalement, selon Hansen et al (2021) ce serait aussi et bien plus encore la diminution des émissions anthropiques d'aérosols qui serait la cause de cette élévation de température. En effet, ces aérosols ont une durée de vie très courte, si bien que la baisse des émissions est rapidement suivie d'une baisse de leur concentration et donc d'une baisse de leurs effets refroidissant sur le climat. Ces effets refroidissant sont de deux ordres. Tout d'abord, ces aérosols augmentent directement l'albédo de l'atmosphère. Ensuite, ils agissent sur le système nuageux dans le sens du refroidissement climatique. Une cause notoire de cette diminution globale des émissions d'aérosols résulte des restrictions internationales imposées progressivement de 2015 à 2020 sur les émissions de sulfures par les navires. Ainsi, si l'élévation des températures sur la période 2015-2021 semble annoncer sur la période 2016-2035 un dépassement des prévisions les plus pessimistes du 5^e RE, la raison première serait d'origine anthropique (la diminution des émissions anthropiques d'aérosols). Ce qui illustre que l'imprévisibilité du devenir du climat durant le XXI^e siècle est due à une combinaison de l'imprévisibilité de l'humanité et de celle du système bio-Terre.

Une question en retour se pose à propos du méthane. Nous avons noté que l'augmentation rapide du taux de CH₄ est, depuis 2014, une des causes de l'élévation rapide de la température ter-

²⁹⁵ Voir le communiqué de presse de la NASA, 2021 Tied for 6th Warmest Year in Continued Trend, NASA Analysis Shows, 13/01/2022, <https://www.nasa.gov/press-release/2021-tied-for-6th-warmest-year-in-continued-trend-nasa-analysis-shows>, vu le 14/01/2022.

restre, sans en être la cause principale. Inversement, depuis 2014 l'élévation rapide de la température, pour une grande part directement due à la baisse anthropique et imprévue d'émissions d'aérosol, ne serait-elle pas la cause ou l'une des causes de l'augmentation rapide de la concentration de méthane dans l'atmosphère, notamment depuis 2020, via une intensification de la production de méthane des sources naturelles de ce GES ? N'y a-t-il pas là un risque de spirale rétroactive positive entre ces deux augmentations, d'où un risque de début d'emballement climatique ?

Enfin, nous notons que le seuil de température qui serait franchi en l'année 2014 est corrélé avec une plus grande importance prise par les événements météorologiques atypiques ou extrêmes, ce qu'illustre le communiqué de presse de l'OMM daté du 21 mars 2017²⁹⁶ où nous pouvons lire, sous la plume de David Carlson, Directeur du Programme mondial de recherche sur le climat : « *Alors même que le puissant Niño de 2016 s'est dissipé, nous assistons aujourd'hui à d'autres bouleversements dans le monde que nous sommes bien en peine d'élucider: nous touchons ici aux limites de notre savoir scientifique concernant le climat et nous avançons maintenant en territoire inconnu* ».

III.2.2 - Les différentes sources d'émissions

III.2.2.1 - Les sources anthropiques

Cette section reprend des données issues d'un document du Global Carbon Project daté de 2019²⁹⁷, du rapport intégral de la contribution du GT1 au 5^e RE (tableau 6.8, page 507) et d'une interview de Marielle Saunois réalisée en 2016²⁹⁸.

296 <https://public.wmo.int/fr/medias/communiqu%C3%A9s-de-presse/nombreux-records-pulv%C3%A9ris%C3%A9s-en-2016-dans-le-domaine-du-climat-avec-des>

297 Global Carbon Project (2019). *Global Carbon Atlas* [URL : <http://www.globalcarbonatlas.org/en/CH4-emissions>].

298 Marielle Saunois. *Le méthane en augmentation dans l'atmosphère*. Interview par Laure Cailloce. Journal du CNRS, 12/12/2016.

Les émissions anthropiques de méthane représentent environ 60 % des émissions totales. L'augmentation du taux de méthane dans l'atmosphère observée depuis le début de l'ère industrielle proviendrait essentiellement de celles-ci, lesquelles sont issues pour environ 60% des activités agricoles (rizières en surface inondée, élevage de ruminant, fermentation des fumiers...) et pour environ un tiers des fuites de méthane liées à l'exploitation des énergies fossiles, conventionnelles et non conventionnelles. Les quelques pour cent restants proviennent de combustions incomplètes de biomasse, dont notamment celles de bois à usage domestique, d'une part, et, d'autre part, de déchets divers.

Une politique radicale pourrait consister à mettre un terme à l'ensemble des activités humaines émettrices de méthane. Cette voie est aujourd'hui envisagée, mais uniquement pour l'énergie, selon une programmation sur plusieurs décennies. A propos des émissions de l'agriculture, à côté de la limitation de certaines productions et consommations, il existe des voies d'atténuation pour une production ou une consommation donnée : modification des régimes alimentaires des ruminants (bovins, ovins, caprins), recours à des races moins émettrices, maintien prolongé en production des vaches, brebis et chèvres, voire utilisation de filtres récupérant le méthane émis ; mode de culture du riz qui réduit le recours à l'irrigation ; récupération du méthane issu de la fermentation des fumiers ; etc.).

III.2.2.2 – Focus sur quatre sources naturelles contenues dans le *Reste causal*

Selon le RID de la contribution du GT1 au 5^e RE, le *Reste causal* associé aux scénarios climatiques pour le XXI^e siècle contient les émissions naturelles de méthane. Ceci est exprimé en ces termes : "*Les scénarios utilisés par le Groupe de travail I sont axés sur les émissions anthropiques et ne prennent pas en compte les évolutions des facteurs naturels, tels que le forçage solaire ou volcanique, ou les émissions naturelles, par exemple de CH₄ et de N₂O.*"²⁹⁹. Parmi les sources de ces émissions naturelles, quatre retiendront plus particulièrement notre attention : le

299 Encadré RID.1, p. 29.

dégel du pergélisol, la fonte d'hydrates des fonds marins, la fonte de glaciers polaires et le développement de populations de micro-organismes marins méthanogènes.

Dans un document, publié en novembre 2013, Philippe Bousquet, chercheur et modélisateur des GES dans l'atmosphère, auteur contributeur du Chapitre 6 du 5^e RE, intitulé *Carbon and Other Biogeochemical Cycles*,³⁰⁰ précise :

« Pour les prochains siècles, les projections climatiques indiquent que c'est dans la région arctique que la température augmentera le plus. Un risque d'émissions massives de méthane pourrait alors apparaître, comme cela a pu se passer dans l'histoire ancienne de la Terre. Une éventuelle bouffée de méthane pourrait être due :

- au dégel de pergélisol continentaux (ou océaniques) riches en matières organiques pouvant conduire à une production et à une émission de méthane par le développement d'une activité bactérienne (il s'agit en fait d'archées) produisant du méthane si le milieu contient pas ou peu d'oxygène.
- à la déstabilisation des hydrates de méthane, ces cages d'eau gelée piégeant du méthane en quantité importante dans les marges continentales océaniques et sous les pergélisols continentaux.

Ce risque de bouffée de méthane n'est probablement pas immédiat mais il impose de mieux comprendre et quantifier certains mécanismes mis en jeu dans le cycle du méthane. Il impose aussi une surveillance sur le long terme du méthane atmosphérique, notamment à cause de la sensibilité climatique de la région arctique. ». Notons que l'emploi de l'expression « n'est probablement pas immédiat » induit la reconnaissance d'un risque pour le XXI^e siècle.

Explorant ce risque, nous verrons que la contribution au changement climatique durant le XXI^e siècle de ces deux sources naturelles de méthane (pergélisol et hydrates) est largement imprévisible. Dans le même temps, nous avons vu ci-dessus que cette contribution potentielle, dont nous verrons qu'elle est abordée dans le rapport intégral du GT1, n'est pas prise en compte par les scénarios du 5^e RE du GIEC, mais est renvoyée dans leur *Reste causal*. Ces deux sources

300 Philippe Bousquet. *Méthane et climat. Site le climat en question*. 19/11/2013. <https://www.climat-en-questions.fr/reponse/mecanismes-devolution/methane-systeme-climatique-par-philippe-bousquet> . Vu le 18 novembre 2021.

pourraient donc suffire au développement de notre thèse. Cependant, notre attention va aussi se porter sur deux autres émetteurs naturels de méthane.

L'un est la fonte de glaciers polaires. Nous l'avons sélectionné car ce n'est que récemment que des travaux scientifiques ont montré qu'il représente le risque de devenir une source conséquente de méthane (et de dioxyde de carbone), et ainsi d'apporter une contribution non marginale au réchauffement climatique. Cette découverte récente met ainsi en exergue la nécessité de prendre en considération la Catégorie *Inconnu inconnu* dans laquelle cette source naturelle potentiellement importante se situait il y a seulement quelques décennies. « Prendre en considération » n'implique pas d'intégrer l'Inconnu inconnu dans les modèles et les scénarios climatiques, bien évidemment, mais signifie rappeler dans toute publication scientifique relative à ces scénarios et plus encore dans toute publication destinée aux décideurs et au grand public que des phénomènes de la catégorie Inconnu inconnu pourraient fortement agir sur le devenir du climat durant le XXI^e siècle et éventuellement contribuer à un emballement climatique.

L'autre est le vivant marin méthanogène ou plus exactement les changements du vivant marin méthanogène. Nous l'aborderons car, contrairement aux trois sources précédentes, la cause anthropique du risque qu'il présente ne se réduit pas au réchauffement climatique. D'autres perturbations anthropiques telles que la pollution par les nitrates sont en jeu. De surcroît, son rôle est central dans l'histoire du climat (voir par exemple plus haut sa place déterminante dans le climat de l'éon Archéen) et son importance pourrait devenir première dans de futurs stades du réchauffement en cours. Enfin, le niveau d'imprévisible et d'inconnu est ici particulièrement élevé. A ces motivations relatives aux sciences naturelles, s'ajoute le constat que cette question est totalement absente du 5^e RE du GIEC.

Pour des raisons de concision, nous avons exclu de nos travaux d'autres évolutions ou apparitions de sources naturelles de méthane, qui pourraient jouer un rôle important dans le réchauffement climatique global du XXI^e siècle et se trouvent dans le *Reste causal* associé aux scénarios pour le XXI^e siècle du 5^e RE. Nous pensons en particulier aux zones humides dont les émissions de méthane devraient s'amplifier avec le réchauffement. Nous pensons aussi à des forêts qui seraient victimes d'incendies ou de dépérissements.

III.2.3 – Feuille de route

Chacun des quatre phénomènes suivants - le dégel du pergélisol, la fonte de glaciers polaires, la fonte d'hydrates des fonds marins et les bouleversements du vivant marin - pourrait potentiellement devenir une source importante de méthane rejoignant l'atmosphère durant le XXI^e siècle. Chacun d'eux constitue donc, pour le changement climatique, un phénomène causal potentiel. Nous avons vu que, selon le RID de la contribution du GT1 au 5^e RE, aucun d'entre eux n'avait été pris en compte dans la production des scénarios pour le XXI^e siècle de ce rapport.

Pour chacun d'eux, nous étudierons notamment les trois questions suivantes :

- Un risque majeur d'une expression durant le XXI^e siècle de ce phénomène causal potentiel était-il scientifiquement identifié lors de la rédaction de la contribution du GT1 au 5^e RE ?
- S'agit-il d'un phénomène dont l'impact sur le climat (plus précisément dont les émissions de méthane dans l'atmosphère) durant le XXI^e siècle était scientifiquement quantifiable ou probabilisable lors de cette rédaction ?
- Que dit, sur chacune des deux questions précédentes, le GT1 du GIEC dans sa contribution au 5^e RE ?

III.2.4 - Le pergélisol

III.2.4.1 - Introduction

Le pergélisol, sol gelé en permanence pendant au moins deux années consécutives, se trouve exclusivement au Nord de la planète. Il est essentiellement situé sur les continents (Alaska, Sibérie...), mais une partie a été recouverte par la mer, suite à l'expansion de celle-ci lors de la dernière déglaciation. Dans tous les cas, qu'il soit continental ou marin, sous le pergélisol se trouvent des hydrates de méthane. Ces derniers sont susceptibles d'être déstabilisés et de libérer leurs molécules de méthane lors du dégel du pergélisol. En outre, s'il s'agit d'un pergélisol ter-

restre, le dégel s'accompagne de la formation de mares thermokarst émettrice de dioxyde de carbone et de méthane. En effet, dans ces mares des micro-organismes produisent du méthane dans les fonds anaérobiques, c'est-à-dire contenant très peu ou pas d'oxygène, et du dioxyde de carbone en milieu aérobique. Enfin, la destinée d'une molécule de méthane issue du dégel du pergélisol, qu'elle soit issue d'hydrate ou fraîchement produite par une archée, est parfois de rejoindre l'atmosphère, mais, le plus souvent, auparavant elle sera détruite par une bactérie méthanotrope au bénéfice de la production d'une molécule de dioxyde de carbone ; elle pourra aussi tout simplement être dissoute et ainsi rester dans l'eau de la mare ou de la mer, aussi longtemps que celle-ci ne sera pas saturée en méthane.

L'éventualité d'émissions conséquentes de méthane dans l'atmosphère dues au dégel de pergélisol suite au changement climatique n'est pas prise en considération, en tant que phénomène causal, par les scénarios/projections pour le XXI^e siècle du 5^e RE du GIEC. Cela est annoncé dans le RID du GT1, nous l'avons vu. Cela l'est aussi dans le Résumé technique³⁰¹ ainsi que dans le Rapport intégral³⁰². Nous trouvons la même information dans des articles de recherche, par exemple dans un article de Kuhry P. et al. (2010), qui plus est à propos de l'ensemble des GES : « (...) *le réchauffement climatique entraîne le dégel du pergélisol, ce qui provoque une nouvelle augmentation des gaz à effet de serre dans l'atmosphère terrestre, d'où un réchauffement encore plus important. Cet effet n'est pas encore pris en compte dans les projections des modèles climatiques concernant le futur réchauffement de la planète.* ». (VOA³⁰³).

301 Résumé technique du GT1, page 93 du document comportant le rapport intégral et ses résumés.

302 Rapport intégral du GT1. Chapitre 6 : executive summary, p. 468 ; section 6.4.3.4 p. 526. Et chapitre 12 : section 12.4.8.1, p. 1096.

303 « (...) *climate warming results in permafrost thawing that causes a further increase of greenhouse gases in the Earth's atmosphere, resulting in even more warming. This effect is not yet considered in climate model projections of future global warming.* ».

III.2.4.2 - Un potentiel colossal

III.2.4.2.1 – Selon le 5^e RE, contribution du GT1

a. Le dégel en cours et à venir

Dans le RID de la contribution du GT1 au 5^e RE, le GIEC constatait que le dégel du pergélisol terrestre était déjà en marche³⁰⁴ : « *On peut affirmer, avec un degré de confiance élevé, que les températures du pergélisol ont augmenté dans la plupart des régions depuis le début des années 1980. Le réchauffement observé atteignait 3 °C dans certaines régions du nord de l'Alaska (entre le début des années 1980 et le milieu des années 2000) et 2 °C dans certaines régions du nord de la partie européenne de la Russie (entre 1971 et 2010). Dans cette dernière région, une réduction considérable de l'épaisseur et de l'étendue spatiale du pergélisol a été observée au cours de la période 1975–2005 (degré de confiance moyen).* ».

Le terme « considérable » dans un RID est à remarquer par sa force, mais aussi par son imprécision.

Plus loin, ce RID se tourne vers la fin du XXI^e siècle³⁰⁵ : « *Il est quasiment certain que l'étendue du pergélisol de surface (jusqu'à 3,5 m de profondeur) diminuera dans les hautes latitudes de l'hémisphère Nord, au fur et à mesure que la température moyenne à la surface du globe augmentera. Vers la fin du XXI^e siècle, la superficie du pergélisol de surface diminuera, selon les projections, de 37 % (RCP2,6) à 81 % (RCP8,5) (degré de confiance moyen).* »

b. Des stocks de carbone considérables

Par ailleurs, dans le rapport intégral est donnée une estimation de la quantité de carbone stockée dans le pergélisol : « *Depuis le quatrième rapport d'évaluation du GIEC, les estimations de la quantité de carbone stockée dans le pergélisol ont été considérablement revues à la hausse, ce*

304 Page 9. Section B.3.

305 Page 25. Section E.5.

qui fait que le stock de carbone du pergélisol équivaut à deux fois le stock de carbone atmosphérique. »³⁰⁶ (VOA³⁰⁷).

c. Quelles estimations des émissions durant le XXI^e siècle ?

Enfin, le RID donne une estimation/projection des émissions de CO₂ et CH₄, ces deux gaz confondus, liées au dégel du pergélisol, cumulées sur le XXI^e siècle³⁰⁸, mais cela uniquement pour le profil RCP8,5, celui qui présente les plus importantes émissions anthropiques : « *Les estimations du dégazage de CO₂ et de CH₄ vers l’atmosphère provenant de carbone stocké dans des pergélisols en dégel au cours du XXI^e siècle sont comprises entre 50 et 250 GtC pour le RCP8,5 (faible degré de confiance)* ». Nous retrouvons ces chiffres dans le rapport intégral³⁰⁹. Ils y sont suivis des résultats de deux études associées à ce profil RCP de concentration, qui entrent dans la fourchette 50-250 GtC ci-dessus, puis du résultat d’une étude associée aux profils SRES d’émissions anthropiques. Cette dernière présente des émissions naturelles de CO₂ et de CH₄, dues au dégel du pergélisol au cours du XXI^e siècle, plus importantes, situées entre 68 et 508 GtC.

Pour éclairer les estimations ci-dessous, nous pourrions être tentés de les mettre directement en regard de la quantité totale de carbone présent dans l’atmosphère, laquelle est de l’ordre de 850GtC³¹⁰. Cependant, cette quantité est celle d’un stock, alors que le chiffre des émissions naturelles donné ici est la somme d’ajouts annuels destinés à être pour partie compensés par l’activité des puits de carbone (de CO₂ et de CH₄). Dans une toute première approche, où volontairement nous minimiserions l’accroissement du stock, nous pourrions considérer que la moitié de ces ajouts serait absorbée par des puits de carbone. Ainsi, à la fin du XXI^e, il y aurait un surplus

306 Chapitre 12, section 12.5.5.4, page 1116.

307 « *Since the IPCC AR4, estimates of the amount of carbon stored in permafrost have been significantly revised upwards, putting the permafrost carbon stock to an equivalent of twice the atmospheric carbon pool.* ».

308 Section E.7, page 27.

309 Chapitre 6. Section 6.4.3.4. Page 526.

310 Cette estimation, 850GtC dans l’atmosphère terrestre, est tirée du croisement de deux chiffres : 1700GtC/2 (Caillose, 2015, p. 32) ; ~ 4x220GtC (Micaela & all, 2020).

de CO₂ et de CH₄ dans l'atmosphère situé entre 25 et 125 GtC selon l'estimation du GIEC, et entre 34 et 254 GtC selon la troisième étude présentée dans le 5^e RE ; surplus que nous pourrions comparer aux 850 GtC de ces deux GES actuellement dans l'atmosphère. Enfin, nous pourrions aussi directement comparer les estimations d'émissions naturelles issues du pergélisol données ici par le GIEC avec les émissions anthropiques du profil RCP8,5, lesquelles sont situées, pour le seul CO₂, entre 1 415 et 1 910 GtC.

Cependant, n'allons pas donner à ces chiffres un sens et une valeur qu'ils n'ont pas. Comme nous l'avons vu, l'élaboration des profils RCP de ce 5^e RE n'a tout simplement pas pris en considération les émissions de GES qui seront engendrées par le dégel du pergélisol, ainsi que par bien d'autres phénomènes causaux renvoyés dans le *Reste causal* associé à ces profils. Or, dans le cadre du profil RCP8,5, dans lequel ici nous nous situons, le dégel du pergélisol et, qui plus est, la combinaison des phénomènes causaux écartés devraient avoir un impact important.

A titre d'illustration, nous proposons une observation théorique sur les profils RCP et les estimations ci-dessus d'émissions de GES associées. Les profils RCP sont des profils de concentration contrainte des GES, en d'autres termes la concentration est fixée. Une estimation des émissions anthropique de GES associées au profil RCP8,5 aurait donc dû prendre en considération les émissions naturelles du pergélisol. En d'autres termes, la fourchette 1415-1910GtC d'émissions anthropiques de CO₂ devrait, du moins en première approximation, être réduite de la quantité d'émissions de CO₂ du pergélisol, laquelle constitue la part essentielle de la fourchette 50-250GtC de CO₂ et CH₄. Enfin, nous notons que la nouvelle fourchette d'émissions anthropiques devrait intégrer l'intervalle d'incertitude sur les émissions du pergélisol, ce qui en amplifierait notablement l'amplitude.

Toutefois, cette observation théorique n'a qu'une valeur limitée. En effet, nous le verrons plus loin dans ce sous-chapitre, la connaissance scientifique sur la fonte du pergélisol est lacunaire, ce qui rend difficile, voire impossible, toute quantification des émissions durant le XXI^e siècle, y compris sous la forme de fourchette large telle que 50-250GtC.

III.2.4.2.2 – Hors GIEC, avant le 5^e RE

Découverte d'émission de méthane par l'océan Arctique

Une étude de l'International Arctic Research Center (IARC) de l'université de Fairbanks en Alaska, publiée le 5 mars 2010, montrait l'existence de fuites du méthane emmagasiné sous la forme d'hydrates sous les 2,1 millions de km² de l'Arctique qui « *pourraient avoir à l'avenir un effet dramatique sur le réchauffement climatique* ». (Shakhova N. et al., 2010, p.1246). Selon cette étude, ces émissions, issues du pergélisol recouvert par la mer lors de la dernière déglaciation, sont en quantité équivalente à l'estimation qui était auparavant faite des émissions de méthane de l'ensemble des surfaces océaniques de la planète. En outre, contrairement à ce qui était supposé, le plateau arctique de Sibérie orientale est largement saturé en méthane, plus de 80 % de l'eau des fonds marins est saturée et plus de 50 % de l'eau de surface. L'hypothèse selon laquelle le pergélisol marin était stable a ainsi été remise en question.

Dès la rédaction du 5^eRE le risque d'émissions massives de méthane dues au dégel du pergélisol était scientifiquement identifié. L'attention à porter à ce risque était d'autant plus nécessaire que les connaissances scientifiques portant sur ce dégel et sur les émissions associées étaient lacunaires et pouvaient laisser supposer un segment d'inconnus inconnus conséquent ; sujet sur lequel nous reviendrons dans la section 'III.2.4.3 – Un futur non quantifiable'.

III.2.4.2.3 – Hors GIEC, après le 5^e RE

Dix ans plus tard, en 2020, une publication (Micaela & all, 2020) montrait une menace sur le pergélisol marin proche des côtes, avec des risques pour le climat mais aussi en termes d'érosion des côtes. Elle précisait « *L'élévation du niveau de la mer après le dernier maximum glaciaire a submergé des millions de kilomètres carrés de permafrost terrestre arctique. Ce pergélisol relique sous l'océan est un stock de carbone organique important (...). On estime que l'ensemble des surfaces du plateau continental arctique noyées sous au plus 3 mètres d'eau stockent environ 220 Pg³¹¹, soit 220Gt, de carbone organique, soit environ un quart du carbone actuellement contenu dans l'atmosphère* ».

311 Pg, pétagramme, soit 10¹⁵g ou encore 10⁹t, soit 1Gt.

Par ailleurs, une publication de 2019 (Chuvilin E., 2019) montre que le dégazage de méthane lors de la fonte progressive du pergélisol marin est accéléré par la pénétration descendante de sel qui déstabilisent des hydrates de méthane.

Aujourd’hui, des données montrent une ampleur de la fonte du pergélisol très largement supérieure à celle présentée par les scénarios du 5e RE (Farquharson & *al.*, 2019 ; Cailloce, 2015). Ainsi, entre 2003 et 2016, une équipe internationale de chercheurs a surveillé l’évolution du pergélisol de trois sites canadiens représentatifs de la partie arctique du continent américain. Le constat, dès aujourd’hui, est celui d’un dégel du pergélisol à des profondeurs supérieures à celles projetées pour l’an 2090 par les projections RCP 4.5 du 5^e RE du GIEC (Farquharson & *al.*, 2019). Or ces scénarios prévoient pour la période 2090-2100 un réchauffement probable situé entre 2 et 3,5°C par rapport à la période 1850-1900 ; donc très au-delà des 0,9°C de réchauffement de la période d’observation, 2003-2016. Ainsi, sur ces trois sites, la situation était déjà, dès 2003-2016, plus avancée que la projection RCP4.5 pour la fin du XXI^e siècle, laquelle présentait pourtant un réchauffement entre deux et quatre fois supérieur à celui atteint en 2002-2016.

Enfin, un phénomène nouvellement étudié, l’augmentation des éclairs dans la zone polaire nord, pourrait indirectement, en provoquant des incendies, encore amplifier la fonte du pergélisol durant le XXI^e siècle (Chen Y, 2021).

III.2.4.3 – Un futur non quantifiable

Le réchauffement du climat, particulièrement marqué au nord de la planète, a³¹² et aura pour conséquence un dégel de pergélisol. Ce dégel s’accompagne et s’accompagnera d’émissions de dioxyde de carbone et de méthane. Il contribuera donc à une accélération du réchauffement climatique global, cela éventuellement de façon marginale ou au contraire conséquente. Nous avons ici un phénomène typique dont au début des années 2010, c’est-à-dire durant la rédaction du 5^e RE, la quantification scientifique de l’impact sur le climat (i.e. les émissions de GES) du-

312 Voir 5^e RE du GIEC, RID du WG1, page9.

rant le XXI^e siècle n'était pas réalisable (Koven C. D. et al., 2011). A la fin des années 2010, les connaissances s'étaient approfondies, mais la quantification n'était pas davantage réalisable (Box J.E. et al., 2019, p.6-7).

III.2.4.3.1 – Tout était dit dans le 5^e RE du GIEC

Le 5^e RE du GIEC était clair à ce sujet, les émissions de méthane, et plus largement les émissions de GES carboné liées au dégel du pergélisol durant le XXI^e siècle ne sont pas quantifiables. Ainsi nous pouvons lire dans le Résumé technique du GT1³¹³ : « *Les études de modélisation du bilan carbone dans le pergélisol en cas de réchauffement futur qui tiennent compte d'au moins certains processus essentiels liés au pergélisol ne produisent pas de résultats concordants, si ce n'est que le pergélisol d'aujourd'hui deviendra une source nette d'émission de carbone au XXI^e siècle en vertu de scénarios de réchauffement futur plausibles (faible degré de confiance). Notre compréhension des processus pédologiques pendant et après la fonte du pergélisol, y compris des processus entraînant une stabilisation du carbone présent dans les sols non gelés, n'est pas suffisante et empêche toute évaluation quantitative de l'ampleur des changements irréversibles du système climatique potentiellement liés au dégazage du pergélisol et aux rétroactions qui y sont associées* ».

Le rapport intégral du GT1 appuie ce constat et pour se faire se base sur deux difficultés rencontrées par la recherche, l'une associée au dégel du pergélisol proprement dit, l'autre associée aux émissions de GES carbonés consécutive à ce dégel. A propos de la première de ces difficultés, ce 5^e rapport donne une estimation quantifiée du dégel du pergélisol consécutif au changement climatique³¹⁴ (selon les différents profils RCP), mais dans le même temps il précise n'accorder qu'une confiance moyenne en cette quantification "en raison de la forte simplification des processus physiques du sol dans les modèles climatiques mondiaux de la génération actuelle". A propos de la seconde difficulté, le rapport n'accorde qu'un « faible degré de confiance » aux projections (produites par les modèles) de « l'ampleur des pertes de carbone

313 5^e RE, GT1, RT, page 71. Le rapport complet du GT1 développe ce point en son chapitre 6, section 6.4.7.2 *Future Methane Emissions from Permafrost Areas* pages 541-542, et section 6.4.3.4 page 528.

314 Voir chapitre 12 du rapport intégral du groupe1 du 5e RE, figure 12.33 et section 12.4.6.2 pages 1092-1093.

dues aux émissions de CO₂ et de CH₄ dans l'atmosphère du fait du dégel du pergélisol »³¹⁵, en raison des fortes incertitudes et inconnues sur les phénomènes biochimiques qui interviennent dans ces émissions de GES³¹⁶.

III.2.4.3.2 – Un rapport intégral qui édulcore le risque

Bien que le GIEC affirme, dans le 5^e RE, que l'insuffisance des connaissances scientifiques empêche toute évaluation quantitative des conséquences climatiques du dégel du pergélisol pour le XXI^e siècle, dans ce même RE il donne certaines estimations quantitatives des émissions de GES dues à ce dégel. Ainsi une fourchette de 131-533 Tg, soit 131-533 millions de tonnes, d'émissions de méthane issues du dégel du pergélisol, cumulées entre l'an 2012 et l'an 2100, est présentée en tant que résultat d'un article de recherche (Schneider von Deimling T., 2012). Nous reproduisons, ci-après, trois extraits de cet article qui présentent trois des hypothèses sur lesquelles reposent l'étude. Il est remarquable qu'aucune de ces trois hypothèses n'est citée dans le rapport du GIEC ; ce qui change radicalement le sens du résultat de cet article, c'est-à-dire la signification de la fourchette 131-533 Tg. Quelles sont ces hypothèses ?

- La première d'entre elles est donnée dès le titre de l'article, *Estimating the near-surface permafrost-carbon feedback on global warming*. « Near surface » représente la couche supérieure du pergélisol jusqu'à trois mètres de profondeur³¹⁷. Ce titre n'est pas donné dans le 5^e RE, alors qu'il indique noir sur blanc que seule une partie du pergélisol est prise en considération dans le calcul qui a pour résultat la fourchette donnée dans ce RE. De fait, nous avons ici une édulcoration du risque associé à la fonte du pergélisol. Selon Koven C. D. et al. (2011, p. 14773), cette édulcoration n'est pas mineure : « (...) avec l'inclusion de deux mécanismes bien observés - l'inhibition relative de la respiration par le gel du sol et le mouvement vertical dans les sols arctiques qui enfouit le carbone ancien mais labile dans les horizons plus profonds du pergélisol, qui peut être remobilisé par le réchauffement - la réponse du carbone terrestre des hautes

315 Résumé technique du GT1, pages 115.

316 Voir chapitre 6 du rapport intégral du groupe 1 du 5^e RE, section 6.4.3.4 page 528.

317 Confer 2.1 page 650.

latitudes au réchauffement peut passer d'un quasi-équilibre à une source soutenue de CO₂ d'ici le milieu du 21e siècle. » (VOA³¹⁸).

- La deuxième de ces hypothèses : « Nous devons ajouter que nous ne quantifions que les flux de carbone provenant de sols de pergélisol récemment dégelés. »³¹⁹ (VOA³²⁰). Nous avons ici une restriction supplémentaire du pergélisol pris en considération par l'étude qui n'est pas citée dans le RE, ce qui constitue une deuxième édulcoration du risque.

- Troisième hypothèse : « Bien qu'il y ait une grande incertitude, le changement climatique de l'Arctique pourrait augmenter les zones gorgées d'eau (et donc la partie anaérobie de la décomposition (qui produit du méthane)) en raison de l'augmentation des précipitations et de l'augmentation de l'humidité du sol qui y est associée, ainsi que de la formation de lacs thermokarst et de zones humides à mesure que les sols glacés du pergélisol dégèlent et s'affaissent. D'autre part, un drainage accru pourrait entraîner l'effet inverse, même en cas d'augmentation des précipitations. Dans cette étude, nous gardons donc les fractions de surface anaérobie constantes. »³²¹ (VOA³²²). Cette troisième hypothèse ne réduit pas la part du pergélisol pris en considération par l'étude. Par contre, il se pourrait qu'elle ait pour conséquence une sous-estimation substantielle des émissions de méthane associées au dégel du permafrost. Si bien que le fait que cette hypothèse ne soit pas citée dans le RE constitue une troisième édulcoration du risque associé au dégel du pergélisol.

318 « (...) with the inclusion of two well-observed mechanisms: the relative inhibition of respiration by soil freezing and the vertical motion in Arctic soils that buries old but labile carbon in deeper permafrost horizons, which can be remobilized by warming, the high-latitude terrestrial carbon response to warming can tip from near equilibrium to a sustained source of CO₂ by the mid-21st century. ».

319 Page 654.

320 « We should add that we only quantify carbon fluxes from newly thawed permafrost soils »

321 Page 653.

322 « Although there is large uncertainty, Arctic climate change could increase water-logged areas (and hence the anaerobic part of decomposition (which produce methane)) due to increased precipitation and associated soil moisture increases as well as thermokarst lake and wetland formation as icy permafrost soils thaw and subside. On the other hand, increased drainage could lead to the opposite effect, even under increased precipitation. In this study, we hence keep the anaerobic area fractions constant. ».

Nous revenons ici sur ce que dit précisément le 5^e RE à propos de cet article de recherche : « *L'ampleur de la fonte du pergélisol simulée par les modèles climatiques a été utilisée pour estimer la possibilité d'une libération ultérieure de carbone, mais peu d'études répartissent explicitement cette libération en CO₂ ou CH₄ dans l'atmosphère. Schneider von Deimling et al. (2012) estiment les émissions cumulées de CH₄ d'ici 2100 entre 131 et 533 Tg(CH₄) pour les 4 RCP.* »³²³ (VOA³²⁴). Aussi, cette estimation est la seule et unique estimation des émissions de méthane issues du dégel du pergélisol cumulées au cours du XXI^e siècle qui soit donnée. Ainsi, le 5^e RE ne présente qu'une vision manifestement édulcorée du risque associé à ces émissions de méthane.

III.2.4.3.3 – Les émissions actuelles sont elles-mêmes difficilement quantifiables

Établir des estimations des émissions de méthane issues du dégel du pergélisol durant le XXI^e siècle pour chaque profil RCP présente des obstacles aujourd'hui largement insurmontables. Mais le présent lui-même n'est pas dépourvu d'obstacles, et les estimations des émissions actuelles restent l'objet d'importantes incertitudes, ce qui, au demeurant, est à considérer à propos de l'accroissement exponentiel actuel du taux de méthane (voir sous-chapitre III.2.1). Voici deux extraits d'articles de recherche sur le sujet.

« *Les émissions (de méthane) de la zone arctique et boréale au nord de 50°N proviennent principalement des zones humides d'été très étendues et aussi des rejets, surtout en hiver, des très grands champs d'exploitation de gaz arctiques. Cette région abrite également du pergélisol et des hydrates de gaz, bien que les émissions provenant des hydrates de gaz et des suintements semblent actuellement inférieures aux estimations précédentes. (...) Les émissions des hautes latitudes de l'Arctique pourraient actuellement ne représenter qu'environ 4 % du total mondial, bien que la modélisation inverse régionale suggère que jusqu'à 15 % des émissions mondiales de méthane, tant naturelles qu'anthropiques proviennent de la région située au nord de 50°N.*

323 Rapport intégral, chapitre 6, section 6.4.7.2, pages 541-542.

324 « *The extent of permafrost thaw simulated by climate models has been used to estimate possible subsequent carbon release but few studies explicitly partition this into CO₂ or CH₄ release to the atmosphere. Schneider von Deimling et al. (2012) estimate cumulative CH₄ emissions by 2100 between 131 and 533 Tg(CH₄) across the 4 RCPs.* ».

La question de l'importance de la région à l'échelle mondiale reste donc ouverte ». (Nisbet et al., 2019, p.324).

« Nous avons analysé ici un ensemble de données sur les flux de méthane acquises sur 16 ans entre 2002 et 2019 dans le delta de la rivière Lena en Sibérie du Nord (72° 22' 24.1' N, 126° 29' 49.7' E). Cet ensemble de données forme actuellement le plus long enregistrement de flux de méthane de l'Arctique par la méthode de la covariance de Foucault, permettant la première analyse de tendance des flux de méthane directement observés dans un écosystème arctique. » (...) *« Les modèles du système terrestre prévoient une libération accrue de carbone des paysages affectés par le pergélisol en raison du changement climatique, bien qu'il y ait peu d'accord sur le moment et l'ampleur en raison des contraintes d'observation et d'une connaissance incomplète des facteurs et des relations. À notre connaissance, nous fournissons la première preuve observationnelle d'une tendance à la hausse des émissions de méthane au début de l'été dans les zones humides de la toundra, liée au réchauffement atmosphérique. Les tendances observées peuvent encore être modérées, mais elles constituent une évolution notable compte tenu du pergélisol continu très épais et froid de la zone d'étude par rapport à la plupart des autres sites d'observation. Nous apportons également un soutien supplémentaire à l'importance de la saison froide, au cours de laquelle nous estimons que 39 % du méthane annuel total est libéré, alors que la couverture continue des données reste un défi important dans l'hiver arctique. »* (Rößger N. et al, 2022, p.1031 et 1035) (VOA³²⁵).

325 *« Here we analysed a methane flux dataset acquired over 16 yr between 2002 and 2019 in the North Siberian Lena River Delta (72° 22' 24.1' N, 126° 29' 49.7' E). This dataset currently forms the longest eddy covariance methane flux record from the Arctic, allowing for the first trend analysis of directly observed methane fluxes in an Arctic ecosystem. » (...)* *« Earth system models project an increased carbon release from permafrost-affected landscapes due to climate change, albeit there has been little agreement on timing and magnitude due to observational constraints and an incomplete knowledge on drivers and relationships. To our knowledge, we provide the first observational evidence of an increasing trend of early summer methane emissions from tundra wetlands linked to atmospheric warming. The observed trends may still be moderate, yet they constitute a notable development given the very thick and cold continuous permafrost in the study area compared with most other observational sites. We also provide further support for the importance of the cold season, in which we estimate 39% of the total annual methane to be released while continuous data coverage remains a substantial challenge in the Arctic winter. »*

III.2.4.4 – Conclusion

Finalement, dans le 5^e RE, le GT1 expose l'impossibilité de quantifier scientifiquement les émissions de méthane liées au dégel du pergélisol, si bien qu'il peut sembler peu étonnant que les modèles climatiques utilisés pour établir les scénarios pour le XXI^e siècle de ce 5^e RE aient fait l'impasse sur le facteur de changement climatique que constituent ces émissions. Nous avons vu que cette impasse, cette non prise en compte, n'est pas mise dans l'ombre, mais est indiquée à différents niveaux du rapport. En revanche, rien dans ce rapport n'alerte sur l'édulcoration du risque climatique que cela induit.

III.2.5 – La fonte des glaciers polaires

III.2.5.1 - Avant le 5^e RE

Bien avant la rédaction du 5^e RE publié en 2013-2014, l'hypothèse a été émise selon laquelle, lors des déglaciations du Quaternaire et possiblement au cours du XXI^e siècle, du méthane produit par des micro-organismes méthanogènes situés sous les glaciers polaires, aurait été et pourrait être émis dans l'atmosphère en quantité conséquente. Des études relatives à cette hypothèse ont été menées dès la fin du XX^e siècle. L'une d'elle a consisté à analyser des prélèvements d'eau effectués au-dessous d'un glacier d'une île du Canada, successivement en 1996, 1997 et 1998 ; (Skidmore et al., 2000). Elle s'est conclue par la preuve de l'existence sous ce glacier de micro-organismes dont certains étaient méthanogènes. En outre, elle a permis de constater qu'un développement de populations de ces micro-organismes est favorisé par des conditions de température tempérée et de présence d'eau que l'on trouve lors de phases de fonte des glaciers. Toutefois, cette découverte ne donnait aucune indication sur les quantités potentielles de méthane ainsi produit ni sur la taille de ces populations ni sur l'étendue des écosystèmes qui les hébergent.

Avant la fin de la rédaction de la contribution du GT1 au 5^e RE, les connaissances scientifiques avaient progressé. En 2008, une étude méritait l'attention des experts du changement climatique : « *Nos résultats suggèrent qu'il se pourrait bien qu'il soit important de considérer les environnements subglaciaires comme une composante active du cycle du carbone de la Terre. Cependant, la détermination de l'impact potentiel de la production de méthane subglaciaire sur les concentrations de méthane atmosphérique pendant la déglaciation, nécessite une détermination plus précise de la capacité, dans des conditions réelles, des microbes subglaciaires à dégrader les composants de carbone organique et leurs taux de métabolisme associés (besoins en énergie)* » (VOA³²⁶) (Wadham et al., 2008). En outre, elle donnait une estimation de la quantité de Carbone organique (CO) présent sous les glaciers polaires de l'hémisphère Nord : entre 418 et 610 GtC.

Voyons maintenant un extrait d'un article de Wadham et al. publié le 29 août 2012, soit l'année qui précéda la publication de la contribution du GT1 au 5^e RE, sur la production et la présence massives de méthane dans l'autre hémisphère, sous l'Antarctique, avec un risque de diffusion dans l'atmosphère en cas de réchauffement de cette région polaire : « *Nous calculons que l'inventaire d'hydrates subantarctique pourrait être du même ordre de grandeur que celui des estimations récentes faites pour le pergélisol arctique. Nos résultats suggèrent que la calotte glaciaire de l'Antarctique pourrait être une composante négligée mais importante du budget global du méthane, avec le potentiel d'agir comme une rétroaction positive sur le réchauffement climatique pendant la déperdition de la calotte glaciaire.* ». (Wadham et al., 2012, Abstract). (VOA³²⁷). En outre, les auteurs estimaient, ici encore dans l'abstract, que sous la calotte de glace de l'Antarctique pourraient se trouver 21 000 GtC de carbone organique. D'autres chiffres sont donnés dans l'article, dont une estimation de la masse de méthane déjà présent sous la ca-

326 « *Our findings suggest that it may well be important to consider subglacial environments as active components of the Earth's carbon cycle. Conclusive determination of the potential impact of subglacial methane production on atmospheric methane concentrations during deglaciation, however, awaits more precise determination of the ability of subglacial microbes to degrade organic carbon components and their associated rates of metabolism under in situ conditions.* ».

327 « *We calculate that the sub-Antarctic hydrate inventory could be of the same order of magnitude as that of recent estimates made for Arctic permafrost. Our findings suggest that the Antarctic Ice Sheet may be a neglected but important component of the global methane budget, with the potential to act as a positive feedback on climate warming during ice-sheet wastage.* ».

lotte, entre 80 et plus de 400 GtC³²⁸. Nous pouvons, mais sans conclusion hâtive, mettre ces chiffres en regard de la quantité de méthane contenu dans les hydrates de méthane des fonds marins, de l'ordre de 1800³²⁹ GtC (Thurber et al., 2020) ou encore en regard de la quantité de méthane contenu actuellement dans l'atmosphère, légèrement inférieure à 4GtC³³⁰. Mais prenons garde à ne pas surinterpréter ces chiffres, vu la courte durée de vie du méthane dans l'atmosphère, ce dernier chiffre, 4GtC, est bien davantage celui d'un flux que celui d'un stock.

Pour clore cette section, nous notons que, malgré les publications scientifiques (dont ci-dessus nous n'avons présenté que trois exemples) et la hauteur des chiffres publiés par Wadham et al. (2008) et Wadham et al. (2012), en 2013 la contribution du GT1 au 5^e RE ne contenait aucun passage en lien avec cette éventuelle rétroaction positive au réchauffement climatique, ni dans le RID ni dans le résumé technique ni même dans le texte intégral.

III.2.5.2 – Après le 5^e RE

En 2014, soit un an après la publication de la contribution du GT1 au 5^e RE, la première étude d'écosystèmes anaérobiques localisés au-dessous de la calotte glaciaire antarctique, situés dans le lac Whillans, donnait lieu à une publication dans la revue *Nature* (Fox D., 2014). En voici un extrait : « *Les échantillons prélevés dans le lac montrent que la vie y a survécu sans l'énergie du soleil au cours des 120 000 dernières années, et peut-être même depuis un million d'années. Ils offrent un premier aperçu de ce qui pourrait être le plus grand écosystème inexploré de la*

328 Page 636.

329 Soit 2400Pg de méthane.

330 Sources croisées :

- Philippe Bousquet. *La carte d'identité du méthane*. Op. Cit., selon lequel en 2013 la masse de méthane atmosphérique était de l'ordre de 4,5GT. Soit 3,4GTC.
- Encyclopédie Universalis, article *Caractéristiques physiques de l'atmosphère, selon lequel la masse de l'atmosphère était de l'ordre de 5×10^{18} kg. D'où, en 2020, une masse du méthane atmosphérique de l'ordre de 3,8GTC.*

Terre, représentant 9 % de la surface terrestre » (VOA³³¹). Notons l'emploi du conditionnel dans la dernière proposition de cet extrait. En effet, l'étude ne portait que sur le lac Whillans, l'un des nombreux lacs situés sous le manteau de glace de l'Antarctique. Si bien que la généralisation aux 9 % de la surface terrestre continentale que représente l'Antarctique, ne peut être qu'une hypothèse qui ouvre un champ de recherche.

Quatre ans plus tard, un article publié en 2018 relatait des émissions vers l'atmosphère de CH₄ issu de dessous un glacier de l'hémisphère Nord, situé au Groenland. « *Ces mesures sont les premières observations d'émissions directes de CH₄ dans l'atmosphère à partir de l'environnement sous-glaciaire de la calotte du Groenland et indiquent une nouvelle voie d'émission de CH₄ qui est actuellement une composante non quantifiée du bilan de CH₄ de l'Arctique* ». (VOA³³²) (Christiansen & Jørgensen, 2018).

L'année suivante, le 2 janvier 2019, un article relate les résultats d'une étude d'une « *zone étendue de la calotte glaciaire du Groenland* » et montre que celle-ci « *libère continuellement des eaux de ruissellement saturées en méthane de son lit pendant la saison de fonte* » et note que « *L'influence de l'écoulement des eaux de fonte sur les exportations de méthane observée ici suggère en outre que les augmentations prévues du réchauffement et des taux de fonte pourraient également entraîner une augmentation des rejets de méthane sous-glaciaire dans l'atmosphère.* » (VOA³³³) (Lamarche-Gagnon G. et al., 2019).

Enfin, près de trois ans plus tard, le 11 novembre 2021, un article relata la découverte d'émissions importantes dans l'atmosphère de méthane et de dioxyde de carbone issues du dessous

331 « Samples from the lake show that life has survived there without energy from the Sun for the past 120,000 years, and possibly for as long as 1 million years. And they offer the first look at what may be the largest unexplored ecosystem on Earth — making up 9% of the world's land area. ».

332 « These measurements are the first observations of direct emissions of CH₄ from the subglacial environment under the Greenlandic Ice Sheet to the atmosphere and indicate a novel emission pathway of CH₄ that is currently a non-quantified component of the Arctic CH₄ budget ».

333 « The influence of meltwater discharge on methane export observed here further suggests that projected increases in warming and melting rates could also lead to increases in subglacial methane release to the atmosphere. ».

d'un glacier du Groenland du fait du réchauffement climatique (Christiansen et al., 2021). En voici des extraits :

- Tout d'abord une contextualisation : « *Les zones humides et le dégel du permafrost sont considérés comme les principales sources d'émissions naturelles de méthane et de dioxyde de carbone dans l'Arctique. Cependant, de nouvelles découvertes montrent que ces gaz sont également émis en grande quantité par l'eau de fonte provenant du sous-sol de la calotte glaciaire du Groenland.* » (VOA³³⁴)

- Plus loin les apports de cette recherche sont précisés : « *L'objectif de notre recherche était d'étudier la quantité de gaz émise dans l'atmosphère et de déterminer l'origine probable de ces gaz. Nos mesures sur le terrain ont montré que les niveaux de méthane dans la cavité de sortie des glaciers sont jusqu'à 100 fois plus élevés que les niveaux de fond de méthane dans l'atmosphère (deux parties par million). Nos résultats montrent que ces gaz proviennent de processus biologiques sous la glace, et que le taux d'émission est contrôlé par la fonte du glacier. Notre étude donne un nouvel aperçu de cette source arctique inconnue de gaz à effet de serre, ce qui nous aidera à comprendre son importance pour la composition de l'atmosphère et sa rétroaction au changement climatique.* » (VOA³³⁵).

III.2.5.3 - Conclusion

Les émissions de méthane dans l'atmosphère dues à la fonte des glaciers polaires constituent un phénomène causal du changement climatique. Ne pouvant donner lieu à aucune quantification

334 « Wetlands and thawing permafrost are considered to be the primary sources of natural methane and carbon dioxide emissions in the Arctic. However, new discoveries show that these gases are also emitted in large quantities from the meltwater coming from under the Greenland Ice sheet. ».

335 « *The aim of our research was to investigate how much is emitted to the atmosphere and what the likely origin of these gases are. Our field measurements showed that the levels of methane in the glacial outlet cavity are up 100 times higher than the background levels of methane (two parts per million) in the atmosphere. Our results show that these gases originate from biological processes under the ice, and that the release rate is controlled by the melting of the glacier. Our study reveals new insight into this unknown Arctic source of greenhouse gases which will help us to understand its broader relevance for the atmospheric composition and its feedback to climate change.* ».

exploitable dans les modèles climatiques, elles étaient reléguées dans le *Reste causal* associé aux scénarios climatiques du XXI^e siècle publiés dans le 5^e RE du GIEC. Lors de la rédaction de ce rapport, ce phénomène était clairement identifié et la question de son ampleur potentielle, éventuellement massive, était posée ; néanmoins, il resta totalement absent de l'ensemble du rapport.

III.2.6 - La modification des courants marins

La modification des courants marins pourrait contribuer à l'activation de deux sources naturelles de méthane : la désagrégation d'hydrates de méthane et le développement de populations d'organismes marins méthanogènes. Ces dernières sont les objets des deux prochains sous-chapitre

III.2.6.1 - Selon le 5^e RE du GIEC

Le RID du GT1, et de façon plus développée le RT, abordent la question de l'évolution de l'Atlantic Meridional Overturning Circulation (AMOC), en français « Circulation méridienne océanique de retournement de l'Atlantique », dont le Gulf Stream est une composante. L'AMOC est la partie Atlantique de la Circulation méridienne océanique de retournement (MOC) encore appelée Circulation thermohaline. Cette dernière est une boucle complexe de courants océaniques. Elle contribue à la distribution de la chaleur sur Terre et constitue un déterminant majeur des climats locaux.

Nous reprenons ici un extrait du RT portant sur ce point³³⁶: « *Il reste très probable que l'AMOC, faiblira au cours du XXI^e siècle par rapport aux valeurs 1850–1900. Les estimations les plus probables et les plages d'incertitude obtenues à partir du projet de Comparaison de modèles couplés (CMIP5) sont de 11 % (1 à 24 %) pour le profil représentatif d'évolution de concentration RCP2,6 et de 34 % (12 à 54 %) pour le RCP8,5, mais un faible degré de confiance est associé à l'amplitude de cet affaiblissement. Il reste par ailleurs très improbable que l'AMOC subisse une transition brusque ou un affaiblissement majeur au cours du XXI^e*

336 Axe thématique.5, page 70.

siècle dans le cadre des scénarios considérés (degré de confiance élevé). Pour que l'AMOC subisse une transition brusque, sa sensibilité au forçage devrait être bien plus grande qu'elle ne l'est dans les modèles actuels, ou bien elle exigerait un flux d'eau de fonte de la nappe glaciaire du Groenland dépassant de loin les projections actuelles même les plus élevées. ».

Il est à noter qu'un « faible degré de confiance » est associé aux chiffres donnés dans la première partie de cet extrait. Par ailleurs, la probabilité d'une transition brusque est estimée entre 10 % et 0 % (très improbable). Au vu de la hauteur des enjeux associés, ce niveau de probabilité, entre 10 % et 0 %, ne peut être négligé. Aussi, l'affirmation « Pour que l'AMOC subisse une transition brusque, sa sensibilité au forçage devrait être bien plus grande qu'elle ne l'est dans les modèles actuels, ou bien... » trouvera un rebond dès le mois de mai 2013, puisqu'une publication scientifique montrera qu'effectivement avant 2013 tous les modèles comportaient un biais dont une conséquence était justement une minoration de la sensibilité de l'AMOC au forçage radiatif. Nous développerons ce point dans la troisième section (II.2.6.3) de ce sous-chapitre.

Enfin, notons que, plus loin dans le texte³³⁷, le RT précise que les observations des courants marins étaient, lors de la rédaction du 5^e RE (au début de la décennie 2010) insuffisantes pour évaluer les évolutions durant le XXI^e siècle et au-delà : « *Le nombre de séries chronologiques d'observations continues permettant de mesurer l'importance des caractéristiques de la circulation océanique liées au climat (comme la circulation méridienne océanique de retournement) est limité et les séries chronologiques existantes sont toujours trop courtes pour que l'on puisse évaluer les tendances décennales et à des échéances plus longues.* ». Ainsi, le contenu des extraits précédents reposait sur des modèles réduits à de simples constructions théoriques qui ne bénéficiaient pas de vérification par des données de mesure expérimentale. Si bien qu'il s'agissait d'un savoir scientifique dont le niveau de maturité pouvait sembler insuffisant pour le traduire en un savoir d'expertise.

Enfin, les changements des courants océaniques ne se limitent pas aux ralentissements de l'AMOC ou à une brusque interruption de celle-ci. Ainsi, selon le RID du GT1³³⁸ : « À l'échelle

337 RT.6.1, page 114.

338 Section E.4, page 24.

mondiale, l'océan continuera à se réchauffer au cours du XXI^e siècle. De la chaleur sera absorbée à la surface et pénétrera jusqu'à l'océan profond, perturbant la circulation océanique. ». Et, selon le rapport intégral³³⁹, certains gyres connaissent déjà une contraction alors que d'autres connaissent une expansion. Enfin, selon le rapport intégral, la circulation circumpolaire antarctique aurait subi un déplacement vers le sud³⁴⁰.

III.2.6.2 - Selon les scientifiques, avant la période de rédaction du 5^e RE : menace sur l'AMOC et le Gulf Stream

Dans un ouvrage destiné à un large public, Valérie Masson-Delmotte³⁴¹ (2011) rappelle que « *La dernière période glaciaire a été ponctuée par une succession de 25 instabilités abruptes (les événements dits de Dansgaard-Oeschger), marquées dans l'hémisphère Nord par des successions de phases froides et de brusques réchauffements (8 à 16°C en 50 à 500 ans au Groenland)* ». Puis elle précise que « *Ce ne sont pas des changements « globaux », au sens où les phases froides du Groenland correspondent à des phases de réchauffement en Antarctique (...). On parle donc de « bascule interhémisphérique » : ces instabilités brutales du climat mettent en jeu une réorganisation du transport de chaleur par les courants marins, en particulier dans l'océan Atlantique.* ». A l'origine des phases froides du Groenland, il y a l'apport d'eau douce dans l'Atlantique Nord provenant du réchauffement des calottes glaciaires et de l'augmentation des précipitations, et de là une diminution de la densité de la couche supérieure d'eau de mer, ce qui entraîne un arrêt de la plongée de l'eau de surface vers les eaux profondes, et donc un arrêt « du grand tapis roulant océanique ». Elle conclut par « *Ces arrêts de la circulation océanique se traduisent par une lente accumulation de chaleur du côté de l'océan Austral et dans les régions tropicales, et, à l'inverse, par un refroidissement marqué à nos latitudes ou au Groenland.* ».

Ces propos de Valérie Masson-Delmotte rappellent qu'en cas d'une transition brusque ou d'un arrêt de l'AMOC, l'Océan Austral, l'Antarctique ainsi que les régions tropicales subissent un

339 Section 3.9, page 301.

340 Section 3.6.5.2, page 285.

341 Pages 47-48.

réchauffement. Dans le cas présent, quelles en seraient les conséquences sur les hydrates de méthanes stockés dans l’océan Austral et sous la calotte antarctique, quelles en seraient les conséquences en termes de fonte de la calotte antarctique, et corrélativement les conséquences en termes d’intensification du réchauffement climatique ? Et quelles seraient les conséquences sur le vivant marin ? De plus, n’oublions pas de prendre en considération que si demain un tel arrêt de la circulation océanique atlantique devait survenir, ce serait dans un contexte de période climatique chaude, et non pas dans un contexte de période glaciaire ou de sortie de période glaciaire. Si bien que les conséquences prises dans leur ensemble seraient différentes de celles d’une transition brusque ou d’un arrêt de l’AMOC du Quaternaire. Ainsi, les hydrates de méthane seraient soumis à une situation de réchauffement possiblement inédite qui pourrait se traduire par un relâchement de méthane d’un niveau inconnu depuis au moins 800 000 ans ; et le vivant de l’Océan Austral pourrait rencontrer des niveaux de température inconnus sur la même période. Il convient ici de noter que le 5^e RE précise qu’« *Au cours du XXI^e siècle, selon tous les scénarios RCP, les océans du globe vont se réchauffer. On prévoit un réchauffement maximal des océans en surface dans les régions subtropicales et tropicales. À une plus grande profondeur, c’est dans l’océan Austral que le réchauffement devrait être le plus prononcé* »³⁴². Ainsi, les mers déjà les plus impactées par le réchauffement climatique subiraient le sur-réchauffement consécutif à un brusque arrêt de l’AMOC, d’où un niveau de risque particulièrement élevé en termes de fonte d’hydrates de méthane et de perturbations du vivant marin.

III.2.6.3 - Un apport scientifique majeur après la période de rédaction du 5^e RE

Le 6 mai 2013, Julie Deshayes et seize autres chercheurs publiaient un article présentant une recherche fondée sur des simulations de l’océan global qui utilisaient une résolution spatiale beaucoup plus fine que celle des précédentes simulations (Deshayes J. et al, 2013). Résultat, l’AMOC et le Gulf Stream pourraient ralentir brutalement, en raison d’une rétroaction majeure positive (amplificatrice) qui apparaît avec la résolution fine des nouvelles simulations, alors

³⁴² Section R.T.5.5.6. Page 93.

qu'elle était donnée négative avec la résolution moins fine des simulations antérieures. Cette publication n'a pu être citée dans le 5^e RE, compte tenu de son arrivée tardive.

Huit ans plus tard, en 2021, la contribution du GT1 au 6^e RE était publiée. Le rapport intégral alertait sur la remise en question des connaissances exposées dans le 5^e RE et sur la baisse de la confiance dans les connaissances : « *Depuis le 5^e RE et le Rapport spécial sur l'Océan et la Cryosphère dans le contexte du Changement climatique, la confiance dans la modélisation et la reconstruction théorique de l'AMOC a diminué en raison de nouvelles observations et d'un désaccord entre les modèles. La confiance dans la modélisation de l'évolution de l'AMOC au cours du XX^e siècle, l'ampleur du déclin de l'AMOC au XXI^e siècle et la possibilité d'un effondrement brutal avant 2100 ont été réexaminées.* »³⁴³ (VOA³⁴⁴)

Quant au RID, il résume le propos en ces termes : « *Il est très probable que la circulation méridienne de retournement de l'Atlantique (AMOC) s'affaiblisse au cours du XXI^e siècle, quel que soit le scénario d'émission. Si la confiance dans l'atténuation de la puissance de l'AMOC durant le XXI^e siècle est élevée, la confiance dans l'ampleur de la tendance est faible. Il existe une confiance moyenne dans le fait qu'il n'y aura pas d'effondrement brutal avant 2100.* »³⁴⁵ (VOA³⁴⁶).

Le changement est remarquable depuis le Résumé technique du 5^e RE. En effet, nous avons vu que ce dernier accordait une « confiance élevée » dans le fait qu'il était très probable que l'AMOC ne subisse pas « une transition brusque ou un affaiblissement majeur » avant 2100 dans le cadre des scénarios considérés. Notons que, outre la baisse du niveau de confiance, le

343 Version adoptée, édition provisoire d'août 2021. Section 9.2.3.1, page 30 du chapitre 9.

344 « *Since the AR5/SROCC, confidence in modelled and reconstructed AMOC has decreased due to new observations and model disagreement. Confidence in modelled AMOC evolution during the 20th century, the magnitude of 21st century AMOC decline, and the possibility of an abrupt collapse before 2100 have been revisited.* ».

345 Section C.3.4, page 42.

346 « *The Atlantic Meridional Overturning Circulation is very likely to weaken over the 21st century for all emission scenarios. While there is high confidence in the 21st century decline, there is only low confidence in the magnitude of the trend. There is medium confidence that there will not be an abrupt collapse before 2100.* ».

vocabulaire est renforcé, il passe d'« une transition brusque ou un affaiblissement majeur » à « un effondrement brutal ».

Finalement, en 2013, le GT1 du GIEC avait traduit un savoir scientifique en un savoir d'expertise, alors que le savoir scientifique n'était pas mûr pour cette traduction ; avec en conséquence une édulcoration du risque climatique associé ; ceci sur une question majeure, non pas uniquement en raison d'un éventuel refroidissement de régions du Nord de la planète, mais aussi et surtout en raison du risque d'un sur-réchauffement de l'Antarctique et des tropiques déclencheur de puissantes rétroactions climatiques positives.

III.2.7 - Les hydrates de méthane des fonds marins

Du méthane est stocké en quantités importantes dans les fonds marins et sous le pergélisol continental ou marin, sous la forme d'hydrate de méthane - aussi appelé clathrate de méthane, glace méthanique ou encore glace qui brûle. L'hydrate de méthane est constitué de « cages » de molécules d'eau glacée contenant chacune une molécule de méthane. Le méthane ainsi piégé a été préalablement généré par des organismes unicellulaires qui, pour ce faire, se nourrissaient de dépôts de matières organiques. Dans les fonds marins, il est présent sous des latitudes et à une profondeur où les conditions de pression, de température et de salinité permettent sa stabilité (Chuvilin E., 2019). Dans ce sous-chapitre nous limiterons notre propos aux hydrates de méthane des fonds marins ; les hydrates situés sous le pergélisol ont déjà été traités, dans le sous-chapitre consacré au dégel de ce dernier. Enfin, nous rappelons que nous avons vu que la fonte d'hydrates de méthane des fonds marins n'est pas pris en considération par les scénarios climatiques pour le XXI^e siècle du 5^e RE, ce phénomène appartient donc au *Reste causal* associé à ces scénarios.

III.2.7.1 – Un risque majeur pour le XXI^e siècle

Les sédiments des fonds marins contiennent des quantités importantes d'hydrates de méthane (Kvenvolden Keith A., 1988 ; Masson Delmotte, 2011, p 99-100 ; Ramstein, 2015 ; Thurber et

al., 2020)³⁴⁷. Selon Gilles Ramstein (2015), les estimations de la masse de méthane contenue dans ces hydrates se situent entre $0,5 \cdot 10^{12}$ et $2,5 \cdot 10^{12}$ tonnes, soit entre 100 et 500 fois plus que la masse de méthane contenue actuellement par l'atmosphère. Cinq ans plus tard, Thurber et al. (2020) retenaient l'estimation haute de Ramstein, à 4 % près, soit 2400 Gt³⁴⁸.

La stabilité des hydrates de méthane repose sur des conditions de température, de pression et de salinité, nous l'avons vu. Cela pose la question du relâchement de méthane dans le contexte du réchauffement climatique. Si la déstabilisation d'hydrates de méthane des fonds marins peut résulter de l'élévation générale de la température des fonds marins, elle peut aussi être due à la modification de courants marins qui, localement, occasionnerait une élévation de la température du sol marin (Dickens et al. 1997, p.261 ; McInerney et Wing, 2011, p.494) : un courant froid peut voir sa température s'élever, il peut aussi s'interrompre, d'où une élévation de températures locales de l'eau ; un courant chaud peut gagner en température ou changer de trajectoire et venir réchauffer localement des fonds marins. Toutefois, l'augmentation de la pression, consécutive à celle de la masse d'eau des océans due à la fonte de glaciers en raison du réchauffement climatique, augmentera la stabilité des hydrates d'ici à 2100, « *mais dans une faible mesure, car l'élévation du niveau de la mer devrait être inférieure à quelques mètres* » (Lamarque, 2008, abstract) (VOA³⁴⁹). Par ailleurs, la masse de méthane piégé sous la forme d'hydrate de méthane dans le sous-sol marin peut se situer jusqu'à une profondeur de 500 mètres sous l'eau ; ainsi, au cours de la remontée dans le sous-sol puis vers la surface des océans, une part notable du méthane relâché peut être transformée par des micro-organismes en un gaz à effet de serre moins puissant, le dioxyde de carbone. Si bien que le risque d'un relâchement rapide d'une majorité du méthane des hydrates dans l'atmosphère est inexistant. Seule une petite part pourrait éventuellement rejoindre l'atmosphère durant le XXI^e siècle ; mais il s'agirait d'une petite part

347 Voir aussi une communication du département de géologie et de génie géologique de l'université de Laval, *Les hydrates de méthane : une réserve énergétique énorme, mais une bombe écologique en puissance*. Québec. 2 février 2006. <http://www2.ggl.ulaval.ca/personnel/bourque/s3/hydrates.methane.htm>.

Ainsi que, section 6.4.7.3., p 542, rapport intégral du Groupe 1 du 5^e RE.

348 Le chiffre donné par Thurber et al. est 1800 GtC ; c'est à dire $1,8 \cdot 10^{12}$ tonnes de carbone contenu dans le méthane, qu'il faut multiplier par 4/3 pour obtenir $2,4 \cdot 10^{12}$ tonnes de méthane.

349 « The role of sea-level rise by 2100 will be to further stabilize methane clathrates, albeit to a small amount as the sea-level rise is expected to be less than a few meters. ».

d'une masse très importante, dont nous avons vu qu'elle pourrait être de l'ordre de 500 fois la masse de méthane actuellement dans l'atmosphère.

Dans le Résumé technique du GT1, 5^eRE, le GIEC nous alertait : « *Les réservoirs de carbone dans les hydrates et le pergélisol sont considérables et ils pourraient donc être de puissants facteurs de rétroaction. Bien qu'elles soient peu limitées, les émissions dans l'atmosphère de CH₄ provenant d'hydrates seront, au XXI^e siècle, probablement faibles à l'échelle planétaire en raison de la sous-saturation de l'océan, du faible rythme de ventilation de l'océan et de la lenteur de propagation du réchauffement par le plancher océanique.* »³⁵⁰. Pour saisir la portée de ce propos, il faut rappeler que dans le langage du GIEC « probablement » signifie un degré de probabilité situé en 66 % et 100%, ce qui veut dire que le risque que les émissions ne soient pas faibles a une probabilité située entre 0 % et 34 %. Étant données les conséquences majeures et irréversibles d'un tel événement, nous pourrions voir dans cette probabilité une invitation à prendre ce risque en considération.

Avant de poursuivre, nous pouvons noter que le langage et les formulations employés dans l'extrait ci-dessus du Résumé technique du GIEC ne favorisent pas une compréhension immédiate et par tous du contenu et du niveau du risque.

Dans le texte intégral de ce 5^e RE, nous retrouvons la même position. Ainsi, les auteurs du chapitre 6, titré *Carbon and Other Biogeochemical Cycles*, ont estimé que le relâchement d'importantes quantités de méthane dans l'atmosphère durant le siècle était improbable³⁵¹. Le résumé exécutif du même chapitre précise : « *La probabilité d'une libération future de CH₄ à partir de carbone marin et d'autres hydrates de gaz du cycle biogéochimique en réponse au réchauffement du plancher océanique est mal connue. Dans l'éventualité d'une libération importante de CH₄ des hydrates présents dans les fonds marins d'ici la fin du 21^e siècle, il est probable que les émissions consécutives dans l'atmosphère se feraient sous forme de CO₂, en raison de l'oxy-*

350 Section RT3.7, page 58.

351 Section 6.4.7.3, page 542.

dition du CH_4 dans la colonne d'eau. » (VOA³⁵²)³⁵³. Nous retrouvons ici le niveau « probable », c'est-à-dire une probabilité située entre 0 % et 34 %.

III.2.7.2 – Une impossible quantification

III.2.7.2.1 - Approche générale

Nous venons de voir que, selon la contribution intégrale du GT1 du 5^e RE, « *La probabilité d'une libération future de CH_4 à partir de carbone marin et d'autres hydrates de gaz du cycle biogéochimique en réponse au réchauffement du plancher océanique est mal connue.* ». Par ailleurs, selon le Résumé technique de cette contribution : « *On accorde un faible degré de confiance aux projections concernant les futures émissions de CH_4 issues de sources naturelles en raison de l'évolution des zones humides et du rejet d'hydrates de gaz par les fonds marins.* »³⁵⁴ Enfin, selon Valérie Masson Delmotte (2011, p. 99-100), « *ce type de phénomène (la fonte d'hydrates de méthane) n'est actuellement pas pris en compte dans les modèles du climat car les processus de déstabilisation et l'ampleur des dégazages de méthane sont encore trop mal connus.* ». Ces différents constats convergent et affirment que, lors de la rédaction du 5^e RE, les scientifiques rencontraient une impossible quantification du devenir, durant le XXI^e siècle, des émissions de méthane dans l'atmosphère dues à la déstabilisation d'hydrates de méthane.

Depuis la publication du 5^e RE, des recherches ont été poursuivies. Cependant, elles n'ont guère permis d'aller vers une quantification. Cela est illustré par Thurber et al. (2020) dans un article qui rappelle les difficultés rencontrées par cette question dans l'océan Austral et sur le continent Antarctique, et qui présente une étude du développement de populations de micro-organismes

352 « *The likelihood of the future release of CH_4 from marine Carbon and Other Biogeochemical Cycle gas hydrates in response to seafloor warming is poorly understood. In the event of a significant release of CH_4 from hydrates in the sea floor by the end of the 21st century, it is likely that subsequent emissions to the atmosphere would be in the form of CO_2 , due to CH_4 oxidation in the water column.* ».

353 G1, chap.6, résumé exécutif, p. 468-469.

354 GT1, Résumé technique, 5^eRE. P.114-115.

méthanotrophes sur un site où était apparu un dégazage de méthane et où, après cinq ans, le filtre que formaient ces populations n'était que très partiellement opérant.

III.2.7.2.2 - Des estimations extrêmement diverses et beaucoup d'inconnus

L'impossible quantification dont il est question ci-dessus est illustrée dans le 5^e RE par une grande diversité d'estimations des émissions dans l'atmosphère de méthane issu de la désagrégation d'hydrates durant le XXI^e siècle. Avant d'observer ces estimations et d'en prendre la mesure, nous rappelons qu'en 2017 l'ensemble des émissions de méthane dans l'atmosphère, toutes origines confondues, était de l'ordre de 600 Tg/an³⁵⁵ dont 370 d'origine anthropique³⁵⁶ (Jackson et al., 2020).

Voici un extrait du rapport complet : « *En utilisant de multiples modèles climatiques, Lamarque (2008) a donné une estimation du flux global de méthane (durant le XXI^e siècle) issu du plancher océanique située entre 560 et 2140 Tg/an, principalement dans les hautes latitudes. Hunter et al. (2013) ont également constaté une dissociation des hydrates au cours du 21^e siècle dans les eaux arctiques peu profondes (...) avec des émissions de 330 à 450 Tg/an pour les RCP4.5 à RCP8.5. On s'attend à ce que la majeure partie du flux de CH₄ provenant du fond marin soit oxydée dans la colonne d'eau en CO₂ dissous. Mau et al. (2007) suggèrent que seulement 1% pourrait être libéré dans l'atmosphère, mais cette fraction dépend de la profondeur de l'eau et des conditions océaniques. Elliott et al. (2011) ont démontré les impacts significatifs de ces rejets au fond de la mer sur l'hypoxie et l'acidité marines, bien que les rejets atmosphériques de CH₄ soient faibles.* »³⁵⁷ (VOA³⁵⁸).

355 1Tg = 10¹²g.

356 Voir, par exemple, le site du CEA :

<https://www.cea.fr/drf/Pages/Actualites/En-direct-des-labos/2020/emissions-de-methane--radioscopie-dun-bilan-mondial-a-la-hausse-.aspx> , vu le 21/11/2021, croisé avec Jackson et al. (2020).

357 Section 6.4.7.3, page 542.

358 « *Using multiple climate models (Lamarque, 2008), predicted an estimate of the global sea floor flux of between 560 and 2140 Tg(CH₄) yr⁻¹, mostly in the high latitudes. Hunter et al. (2013) also found 21st century hydrate dissociation in shallow Arctic waters, with emissions from 330 to 450 Tg(CH₄) yr⁻¹ for RCP4.5 to RCP8.5. Most of the sea floor flux of CH₄ is expected to be oxidised in the water column into dissolved CO₂. Mau et al. (2007) suggest only 1% might be released to the atmosphere but this fraction depends on the depth of water and ocean conditions. Elliott et al. (2011) demonstrated significant impacts of such sea floor release on marine hypoxia and acidi-*

Les fourchettes données ci-dessus donnent des estimations des quantités de méthane libéré par la fonte des hydrates. Mau et al. (2007) « suggèrent que seulement 1 % » pourraient rejoindre l'atmosphère. Ce chiffre de 1 % est repris par Lamarque, un an plus tard, dans son article de 2008, si bien qu'il donne une fourchette 5 – 21 Tg de CH₄ émis chaque année dans l'atmosphère³⁵⁹. Trois ans plus tard, et donc quatre ans après la publication des 1 % de Mau et al., Elliott et al. (2011) exposent les biais et limites³⁶⁰ de leur propre estimation selon laquelle « *les rejets atmosphériques de CH₄ soient faibles* ». Ils précisent que face à la complexité de la question leurs calculs reposent sur des hypothèses simplificatrices et listent un grand nombre de questions conséquentes pour cette estimation qui n'étaient toujours pas résolues en 2011. Plus largement, selon Elliott et al. (2011), les estimations d'émissions, durant le XXI^e siècle, de méthane issues des hydrates (que ce soit les émissions au niveau des fonds marins ou dans l'atmosphère) sont à prendre avec d'infinies précautions en raison de la difficulté à étudier et modéliser ce qu'elles ambitionnent de quantifier.

En outre, nous notons que les estimations ci-dessus des quantités de méthane libéré sont établies pour un scénario climatique donné des RE du GIEC ou par des modèles climatiques. Deux biais se présentent donc d'emblée. Tout d'abord, l'absence de prise en compte des phénomènes situés dans le *Reste causal* associé à ces scénarios. Ensuite, une sous-estimation des changements à venir des courants marins, à tout le moins une sous-estimation du ralentissement de l'AMOC (confer le sous chapitre III.2.6). Ces biais sont la source d'une sous-estimation des quantités de méthane qui seront libérées, d'autant qu'ils invisibilisent le risque d'un processus de changements en cascade dont, dans l'état actuel des connaissances scientifiques, l'ampleur est imprévisible.

Les estimations données dans l'extrait précédemment cité du rapport du GIEC ont une valeur scientifique en soi, et constituent un stade sur le chemin de la construction d'un savoir scientifique qui, une fois suffisamment mûr, pourrait devenir la base d'un savoir d'expertise. Mais, en 2013, ces estimations pouvaient-elles prétendre à une maturité suffisante pour être traduites en

ty, although atmospheric CH₄ release was small. ».

359 Confer l'abstract de cet article.

360 Voir notamment les paragraphes numérotés de 37 à 41.

savoir d'expertise ? Cette mise en question n'est pas que de nature épistémologie, mais aussi et d'abord politique. En effet, ces estimations d'émissions naturelles sont faibles par rapport au niveau des actuelles émissions anthropiques de méthane, ce qui pouvait tendre à détourner l'attention de la hauteur du risque. Enfin, ne peut-on pas y voir une expression de la quantophrénie et d'un besoin psychologique et social immodéré de publier des chiffres ?

III.2.8 - Le vivant marin méthanogène

« *Un écosystème donné peut changer brutalement d'état : un changement minime des conditions environnementales peut entraîner une altération brutale et irréversible du système malgré le rétablissement des conditions environnementales précédentes.* » (Devictor, 2021, p. 46).

III.2.8.1 – Une perturbation inédite

III.2.8.1.1 – Présentation générale

La perturbation ou modification anthropique du monde du vivant est au cœur de notre annexe 1, intitulée *Bifurcation vers l'éon Anthropozoïque*. Elle connaît une accélération depuis deux siècles. Le changement climatique en est désormais l'un des principaux facteurs. Dans une présentation³⁶¹ adressées à ses collègues de l'Institut Pierre-Simon Laplace, le 31 janvier 2022 Valérie Masson-Delmotte notait que le réchauffement actuel suit un rythme bien plus rapide que lors des déglaciations du Quaternaire, de l'ordre de 1°C par siècle au lieu de 1°C par millénaire, ce qui est particulièrement conséquent car « *la vitesse du changement climatique, c'est ce qui exerce une pression sur les écosystèmes et la biodiversité* » et « *les capacités d'adaptation* » de ces derniers sont réduites par la vitesse de ce changement. Ce dernier se combine aujourd'hui avec un ensemble d'autres changements et d'autres contraintes. Le tout constitue une perturbation majeure et inédite du vivant, y compris du vivant marin, objet de ce chapitre.

361 <https://www.youtube.com/watch?v=ZkwaYw8RMzk&t=4445s>

Les mers et océans hébergent un nombre astronomique d'organismes microscopiques, le plus souvent unicellulaires. Ceux-ci, depuis plus de 3,5 milliards d'années, jouent un rôle majeur dans la composition chimique de l'atmosphère, en particulier dans la concentration de gaz à effet de serre, d'une part, et, d'autre part, dans la concentration de divers gaz et éléments qui interviennent dans la formation des nuages. Ces micro-organismes jouent ainsi un rôle déterminant dans les états et les évolutions du climat (ces questions sont développées dans notre annexe 1). Ils sont aujourd'hui soumis à une perturbation multidimensionnelle de leur environnement qui est inédite dans l'histoire du système Terre :

- Réchauffement de l'eau.
- Hausse du taux de CO₂ et acidification.
- Baisse générale du taux d'oxygène³⁶² d'au moins 2 % en 50 ans (Breitburg et al., 2018 ; Schmidtko et al, 2017).
- Accroissement de la présence d'azote dans l'atmosphère et corrélativement de l'azote atmosphérique absorbé par les océans (Duce et al, 2008).
- Baisse de la salinité dans certaines régions de l'océan et hausse dans d'autres régions.
- Première déstabilisation d'hydrates de méthane (Mer Arctique...) d'où localement une chute du taux d'oxygène de l'eau (suite à l'oxydation de molécules de méthane libérées) et une hausse du taux de CO₂ et donc acidification (Elliott et al., 2011).
- Multiplication des zones mortes (voir ci-dessous), d'où un développement de populations d'archées méthanogènes, une menace sur les poissons pélagiques (Stramma et al, 2012), une perturbation du cycle de l'azote (Bristow et al, 2017), etc.
- Accentuation de la stratification des océans et ralentissement des échanges marins verticaux (Guancheng et al., 2020).
- Pollutions diverses : nitrates, microparticules de plastique (Isobe et al., 2021 ; Boucher & al., 2017), etc.
- Premières perturbations du système global des courants océaniques.

362 Voir 5^e RE, GT1, rapport intégral, section 3.8.3., pages 294-298.

- Pêche intensive de surface ou proche de la surface et, depuis les années 1990, pêche en eaux profondes qui pénètre jusqu'à plus de mille mètres sous la surface.
- Bouversements au sein de la faune marine (Dam et al., 2021 ; Flannery-Sutherland, 2021 ; Garilli et al., 2015).
- Déstabilisation des écosystèmes. .
- Etc.

Les zones mortes

Une zone morte est un site aquatique sans oxygène ou à faible teneur en oxygène. Depuis les années 1960, ces zones se multiplient et s'étendent dans les mers et les océans, à proximité des côtes et dans les estuaires, d'une part, et très au large au cœur de tourbillons océaniques, d'autre part. Par ailleurs, on en trouve aussi dans des lacs. L'apparition d'une zone morte s'accompagne du décès de la plupart des animaux (poissons, crustacés...), hormis les espèces qui ont pu fuir, d'où le nom *zone morte*. Cependant, ces zones ne sont pas totalement mortes. Elles abritent des écosystèmes où des archées méthanogènes prolifèrent et contribuent au changement climatique. De plus, ces zones mortes peuvent donner lieu à d'importants flux de protoxyde d'azote (N₂O) de l'océan vers l'atmosphère (Breitburg et al., 2017) ; le protoxyde d'azote est un très puissant gaz à effet de serre qui, en outre, détruit la couche d'ozone de la stratosphère (Ravishankara et al., 2009). Le développement de ces zones est favorisé par l'élévation de la température de l'eau. Le phénomène prend de plus en plus d'ampleur. Ainsi, dans la baie du Bengale, au large de l'Inde, se forme actuellement une zone morte de 60 000 km² (Bristow et al., 2016). Selon une étude parue en janvier 2018 dans la revue *Science* (Breitburg et al., 2018), ces sites situés près des côtes se sont multipliés environ par dix au cours des cinquante dernières années, et sur l'ensemble des océans le volume d'eau totalement anoxique (sans oxygène) a été multiplié par au moins quatre.

A proximité des côtes, de même que dans les lacs, le développement de zones mortes est la conséquence d'un déversement de fertilisants agricoles et de produits industriels, via les rivières, les rejets d'eaux usées, etc. Ce développement résulte du processus suivant, intensifié par

le réchauffement de l'eau : l'excès de nutriments (dont des engrais utilisés pour la culture intensive) occasionne une prolifération d'algues, puis celles-ci se décomposent ce qui donne lieu à une prolifération de micro-organismes qui consomme l'oxygène. Par ailleurs, la prolifération d'algues de surface peut faire obstacle au passage de la lumière et limiter la photosynthèse génératrice d'oxygène. D'où, localement, une eau extrêmement pauvre en oxygène, et de là une prolifération d'archées méthanogènes (pour mémoire, les archées méthanogène ne survivent que dans un environnement non oxygéné ou très peu oxygéné).

III.2.8.1.2 - Alerte sur la déstabilisation des écosystèmes marins

La veille de la publication du 5^e Rapport d'évaluation du GIEC, un article de Laurent Bopp et al. (2013, p.6225 et 6227) alerta sur le devenir des écosystèmes marins en raison d'incertitudes élevées présentées par deux de leurs déterminants ; plus précisément présentées par l'évolution que suivront ces derniers au cours du XXI^e siècle. Le premier est le taux d'oxygène dans la couche d'eau supérieure sous la surface océanique. Le second est la productivité primaire des phytoplanctons, tant au plan régional qu'à l'échelle globale (p.6225).

Dans le même article, les auteurs dressent un état des connaissances acquises en 2012 sur les modifications physiques, chimiques et biochimiques de l'environnement des écosystèmes marins et de l'impact de ces modifications sur ces écosystèmes et sur les organismes qu'ils hébergent. Enfin, ils concluent en précisant que la représentation des écosystèmes marins dans les modèles climatiques étaient, en 2012, une science en évolution qui « *ne prenait en considération qu'un petit ensemble de processus contrôlant les fonctions écosystémique et biogéochimique* » (p.6241).

Depuis lors, les travaux de recherche se sont poursuivis. De nombreux articles récents portent sur les conséquences du réchauffement sur le vivant marin, notamment pour le XXI^e siècle (Guo et al., 2022 ; Yamaguchi et al., 2022 ; etc.), ce que nous illustrons par deux exemples. Selon Guo et al. les vagues de chaleur océaniques, dont le réchauffement climatique augmente l'intensité et la fréquence, affectent et affecteront sévèrement les écosystèmes marins. En 2022, la revue *Nature Climate change* publia une note de synthèse de plusieurs articles où elle note que « *Les projections d'un modèle de pointe du système terrestre suggèrent que la période*

de floraison du phytoplancton marin pourrait être raccourcie dans les océans à haute latitude et à haute productivité. »³⁶³ (VOA³⁶⁴).

III.2.8.2 - Rapidité de l'adaptation du vivant unicellulaire

Les conséquences des perturbations anthropiques du milieu océanique sur les micro-organismes marins (plancton, bactéries, archées...) pourraient prendre des formes diverses dès le XXI^e siècle. Par exemple, des espèces de micro-organismes pourraient voir leur population croître ou décroître, éventuellement de façon significative, voire extrême.

Autre exemple, les mutations de micro-organismes unicellulaires (idem pour les virus) pourraient être la source d'émergences inédites, plus ou moins importantes, plus ou moins conséquentes sur la composition de l'atmosphère, sur le climat et finalement sur l'ensemble du vivant. En effet, ces mutations sont fréquentes et ont la capacité de se diffuser à grande vitesse (sans commune mesure avec les mutations d'organismes pluricellulaires complexes tels que les poissons ou les mammifères), dès lors qu'elles sont particulièrement adaptées aux évolutions/perturbations du milieu ; cela en raison d'une vitesse de reproduction très élevée, dès lors que le milieu est favorable, mais aussi en raison d'échanges de gènes entre individus, y compris entre individus d'espèces différentes. A ce sujet, Janine Guespin-Michel (2011, page 59) souligne « *la rapidité* » et « *l'inventivité* » avec lesquelles « *les bactéries sont capables d'acquérir des caractéristiques phénotypiques*³⁶⁵ *nouvelles.* ».

363 Marine phytoplankton growing season could be shortened in a warmer world. *Nat. Clim. Chang.* **12**, 426–427 (2022). <https://doi.org/10.1038/s41558-022-01354-0>

364 « *Projections from a state-of-the-art Earth system model suggest that marine phytoplankton bloom timing could be shortened in high-latitude, high-productivity oceans.* ».

365 Le phénotype est l'ensemble des traits observables d'un organisme vivant, expressions combinées de facteurs génétiques et environnementaux.

III.2.8.3 - Des bactéries méthanogènes

En 2014, des souches de bactéries SAR11 produisant du méthane sous certaines conditions, ont été découvertes dans la couche supérieure des eaux océaniques (Carini, 2014). Cette découverte était majeure à trois égards :

- nous avons là une explication, *a minima* partielle, de la sursaturation en méthane par rapport à l'atmosphère d'eaux de surface oxygénées des océans du monde, un phénomène appelé le "paradoxe du méthane marin" ;
- avec ces bactéries étaient découvertes les premières bactéries méthanogènes ;
- il s'agissait de la découverte des premiers organisme unicellulaires méthanogènes vivant en milieu oxygéné.

Cette découverte renvoie à la question du devenir du climat puisque, nous l'avons vu, les conditions environnementales où évoluent ces bactéries changent de façon inédite, si bien que l'évolution de ces bactéries au cours du XXI^e siècle est une inconnue dont les conséquences sur le climat pourraient être importantes.

Les scénarios du V^e rapport du GIEC ne pouvaient pas prendre en considération cette inconnue majeure, car l'existence même des bactéries SAR11 méthanogènes n'était alors pas connue. Il s'agissait d'une inconnue inconnue.

Les bactéries SAR11 et les virus marins

Les bactéries SAR11 ont été découvertes à la toute fin des années 1980. Elles ont donné lieu à une première publication scientifique en 1990 (Giovannoni et al., 1990). Quant aux virus marins, leur existence était connue antérieurement, depuis le début des années 1950, mais leur étude n'a vraiment pu se développer que durant les années 1990, grâce à de nouvelles techniques³⁶⁶. Les bactéries SAR11 représentent plus du quart des organismes monocellulaires des

366 Voir *Les virus: un élément important de la boucle microbienne dans l'Océan*. Compte-rendu de la réunion du JSC / WCRP - Le Cap, Afrique du Sud, 16-20 mars 1998. Publié par La Lettre du Changement global. Émanation du CNFCG (Comité national français du changement global), en relation avec l'Académie des sciences, N°9, avril 1999. <https://www.cnrs.fr/cw/dossiers/dosclim1/rechfran/4theme/roledelOcean/virus.html>

eaux de mer. Elles produisent l'essentiel des composés organiques et l'essentiel du CO₂ consommés par les algues qui, par photosynthèse, vont à leur tour produire environ la moitié de l'oxygène des océans (et donc plus du quart de l'oxygène terrestre).

Grâce à un certain nombre de caractéristiques originales, dont une extrême petite taille, les bactéries SAR11 sont particulièrement résistantes et dominantes. Toutefois, le développement de leur population rencontre une limite, elles seraient victimes de l'attitude agressive de virus marins, parmi lesquels le virus HTVC010P (Zhaot al., 2013 ; Vage et al., 2013). Cependant, l'étude des bactéries SAR11 et celle des virus HTVC010P laissent à ce jour de nombreuses questions sans réponse.

Que deviendraient le Monde du vivant et le climat si les interactions entre les bactéries SAR11 et les virus marins venaient à être modifiées ? Par exemple si, après mutation, des virus provoquaient la disparition d'une partie des bactéries SAR11 ? Que deviendrait le climat et le Monde du vivant si la population des bactéries SAR11 productrices de CH₄ ou de CO₂ et indirectement d'O₂ venait à croître ou décroître en raison de perturbations dues à l'activité humaine ?

III.2.8.4 - Le poids de l'imprévisible

Le monde du vivant marin et son devenir durant le XXI^e siècle restent largement inconnus. Cela résulte tout d'abord des limites de la connaissance scientifique du vivant marin tel qu'il est aujourd'hui. Cela résulte ensuite des limites de la connaissance scientifique des changements en cours et à venir du milieu océanique, c'est-à-dire des changements de l'environnement physique et chimique du vivant marin. Cela résulte enfin, et peut-être surtout, des limites de la connaissance face à l'imprévisibilité des voies qu'empruntera l'adaptation du vivant marin aux changements de son milieu. Dès avant le 5^e RE, des articles de recherche contribuaient à la mise en évidence de cet inconnu ; voir par exemple *La réponse des cycles du carbone et des nutriments marins à l'acidification des océans : De grandes incertitudes liées aux hypothèses physiologiques du phytoplancton* (VOA³⁶⁷), d'Alessandro Tagliabue, Laurent Bopp et Marion Gehlen (Tagliabue, 2011). Quant au 5^e RE, le chapitre 3 du GT1, consacré aux observations et

367 *The response of marine carbon and nutrient cycles to ocean acidification: Large uncertainties related to phytoplankton physiological assumptions.*

connaissances de l'océan se conclut par ces termes³⁶⁸ : « *Toutefois, le nombre insuffisant d'échantillons issus des eaux profondes ou portant sur de nombreuses variables biogéochimiques continue de limiter la capacité à détecter et à comprendre les changements (actuels) dans l'océan mondial.* » (VOA³⁶⁹).

C'est pourquoi, le devenir du vivant marin durant le XXI^e siècle, qui est un déterminant de tout premier plan du devenir du climat durant le XXI^e siècle (et au-delà), constitue une composante majeure du *Reste causal* associé aux scénarios climatiques pour le XXI^e siècle. Ces dernières années, un grand nombre de publications de travaux de recherche contribuent à la mise en visibilité de l'importance de cette composante, de ses inconnus et de son imprévisibilité. Un article³⁷⁰ de la revue CNRS info du 9 juillet 2021, *L'océan, puits de carbone à l'avenir incertain*, rédigé sous la plume de Marie Perez, expose l'ensemble des principaux mécanismes connus de l'impact présent et à venir du changement climatique sur le phytoplancton marin et en retour sur le climat lui-même, tout en alertant sur le poids de l'inconnu et la place de l'imprévisible : « *L'océan est un important puit de carbone, capable de capturer le CO₂ atmosphérique grâce au couplage de deux phénomènes, physique et biologique. Il séquestre ainsi près de 30 % du CO₂ émis par les humains. De nombreux aspects du processus biologique, très complexe, restent méconnus et les scientifiques tentent d'en percer les secrets grâce à des campagnes océanographies et le déploiement d'instruments autonomes. Dans ce contexte, difficile pour eux de prédire comment le changement climatique va influencer cette pompe à carbone et quels effets cela aura sur le cycle global du carbone.* ».

Pour conclure, l'humanité provoque un ensemble de perturbations des océans de façon aveugle et il s'avère particulièrement difficile de prédire comment, dans les décennies et les siècles à venir, le vivant des océans et en particulier le micro-vivant évolueront concrètement sous la pression de ces perturbations ; ni quelles en seront les conséquences sur la composition de l'atmosphère, particulièrement sur les taux d'oxygène et de gaz à effet de serre, et donc sur le climat. La protection des océans constitue donc un enjeu global majeur.

368 Page 302.

369 « *However, sparse sampling of the deep ocean and of many biogeochemical variables continues to limit the ability to detect and understand changes in the global ocean* ».

370 <https://www.insu.cnrs.fr/fr/cnrsinfo/locean-puits-de-carbone-lavenir-incertain>

III.2.8.5 - Le silence du 5^e RE

La question des perturbations anthropiques de l'océan, et par conséquent de la perturbation anthropique de l'environnement du vivant marin, est traitée dans les chapitres 3, 6 et 12 de la contribution intégrale du GT1 au 5^e RE.

Le chapitre 3 porte sur les changements des océans durant les quatre décennies qui ont précédé le rapport. Il n'aborde pas les changements à venir. La plupart des perturbations d'origine anthropiques sont présentées : baisse du taux d'oxygène, accroissement du nombre et de l'étendue des zones mortes, augmentation du taux de dioxyde de carbone et acidification, augmentation de la température des différentes couches d'eau ; évolution de la salinité, etc. La question du méthane est présente deux fois dans ce chapitre, mais uniquement pour noter que la fonte d'hydrate de méthane contribue à la baisse du PH (l'acidification) des mers. Rien n'y est dit sur le vivant méthanogène, y compris sur les populations d'archées méthanogènes qui se développent dans les zones mortes.

Le chapitre 6 porte sur les cycles du carbone et autres cycles biogéochimiques. Il y est question du méthane dans trois passages³⁷¹. Pour ce qui est des océans, ici encore seule la désagrégation d'hydrates de méthane est abordée ; rien sur le vivant marin méthanogène.

Le chapitre 12 porte sur les changements climatiques de long terme en général et sur les scénarios pour le XXI^e siècle en particulier. Il aborde les changements projetés du système océanique, cependant, tout comme les chapitres précédents, il ne dit mot sur le vivant marin méthanogène.

Enfin, conformément à la règle selon laquelle le contenu d'un RID ou d'un RT doit être issu du rapport intégral dont il est un résumé, vu que le rapport complet du GT1 ne dit mot du vivant marin méthanogène, nous n'avons trouvé aucune trace du vivant marin méthanogène dans le RID et le RT du GT1. Finalement, la dernière des quatre sources naturelles potentielles de méthane de notre étude était totalement absente de la contribution du GT1 au 5^e RE. Le lecteur du 5^e RE non informé pourrait en déduire qu'il n'existe pas de vivant méthanogène dans les

³⁷¹ Section 6.1.1.2, page 473-474 ; section 6.4.7, page 539 ; FAQ 6.1, page 530.

mers et océans, sinon du vivant marin dont les populations sont insensibles aux perturbations anthropiques de leur environnement (directes telles que la pêche, ou indirectes telles que l'acidification). Certes, lors de la rédaction de ce document, l'existence de bactéries méthanogènes n'avait pas encore été l'objet d'articles de recherche. En revanche, la connaissance de l'existence en milieu marin d'archées méthanogènes anaérobiques était alors bien établie.

III.2.9 – Conclusion : un risque imprévisible d'emballlement et de « changement brusque »

Nous avons présenté quatre sources dites naturelle de méthane, le dégel du pergélisol, la fonte de glaciers polaires, la fonte d'hydrates des fonds marins et le développement de populations de micro-organismes marins méthanogènes. D'ici la fin du XXI^e siècle, chacune d'entre elles pourrait émettre un surplus substantiel de méthane du fait des activités humaines, soit en raison d'une rétroaction positive au réchauffement climatique, soit en raison d'une perturbation d'origine anthropique d'une autre nature (par exemple des rejets de nitrate causant le développement d'une *zone morte* émettrice de méthane), soit en raison d'une combinaison des deux catégories précitées. En outre, et surtout, nous avons ainsi quatre surplus potentiels de réchauffement qui peuvent s'additionner et s'aviver mutuellement. Nous avons finalement un risque d'emballlement de l'ensemble de ces quatre sources naturelles de méthane. De plus, l'ampleur et la probabilité d'occurrence de ce risque d'emballlement sont notablement accrues si nous nous plaçons en situation réelle et prenons en considération l'ensemble des rétroactions positives au réchauffement climatique et des perturbations anthropiques facteurs de réchauffement : surplus d'émissions de méthane par les zones humides continentales, baisse de l'albédo dû au recul des neiges et glaces, allongement de la vie du méthane dans l'atmosphère, dépérissement de la forêt amazonienne (Boulton et al, 2022), etc.

Pour étayer notre propos, nous revenons sur quelques chiffres :

- Actuellement, dans l'atmosphère terrestre nous avons environ 3,4 GtC de méthane et 850 Gt de carbone (tous gaz confondus), essentiellement du dioxyde de carbone.

- Une estimation du carbone organique du pergélisol est de 1700 Gt.
- Une estimation de la quantité de carbone organique sous les calottes polaires est de plus de 20 000 Gt.
- Une estimation de la quantité de méthane sous la calotte polaire de l'Antarctique se situe entre 80 GtC et plus de 400 GtC.
- Une estimation de la quantité de méthane stocké dans les hydrates des fonds marins est de 1800GtC³⁷².
- La durée moyenne de vie du méthane dans l'atmosphère se situe autour de 10 ans et celle du dioxyde de carbone autour de 125 ans.
- Ces durées moyennes de vie augmentent avec le taux de méthane dans l'atmosphère pour la première ; avec le taux de dioxyde de carbone dans l'atmosphère et le taux de dioxyde de carbone dans l'océan pour la seconde.
- L'effet de serre immédiat³⁷³ d'une GtC de Méthane est 65 fois plus important que celui d'une GtC de dioxyde de carbone.
- Le méthane stocké dans l'atmosphère contient environ 60 % de méthane d'origine anthropique. Ce surplus de 60 % est actuellement responsable d'au moins 42 % de l'augmentation du forçage radiatif d'origine anthropique.

En une ou quelques dizaines d'années, un relâchement de méthane dans l'atmosphère, issu des hydrates des fonds marins, du pergélisol, du lit des calottes glacières..., pourrait occasionner un changement climatique brusque. Cette notion est présentée dans le Résumé technique du GT1, 5^e RE³⁷⁴ : « *Le changement climatique brusque est défini dans le cinquième Rapport d'évaluation du GIEC comme un changement de grande échelle touchant le système climatique et s'étalant sur quelques décennies voire moins. Il persiste (ou devrait persister) durant quelques dé-*

372 2400Gt.12/16=1800GtC

373 Plus exactement, il s'agit de l'effet de serre total occasionné par la présence constante dans l'atmosphère d'une GtC de méthane (ce qui signifie un remplacement du méthane détruit en une unité de temps par, dans la même unité de temps, l'émission de la même quantité de méthane émis) comparé à l'équivalent pour le dioxyde de carbone. Les conséquences en termes de changements radiatifs liés aux gaz impliqués dans la décomposition du méthane sont ici pris en compte.

374 Page 70.

cennies au moins, provoquant des bouleversements dans les systèmes humains et naturels. Il existe des informations sur les conséquences potentielles de certains changements brusques, mais de manière générale, la probabilité que ces événements surviennent au cours du XXI^e siècle est associée à un faible degré de confiance et n'est pas unanimement admise. Parmi les exemples de composantes susceptibles de subir un changement brusque figurent la force de la circulation méridienne océanique de retournement de l'Atlantique (AMOC), le rejet du méthane piégé dans des clathrates, le dépérissement terminal des forêts tropicales et boréales, la disparition de la glace de mer d'été dans l'océan arctique, la sécheresse persistante et le déplacement de la mousson. »

Il est notable que dans cette liste de « composantes susceptibles de subir un changement brusque » ne figure pas le vivant marin. De plus, rien n'est dit sur l'*Inconnu inconnu*.

Enfin, nous retenons ce passage de la contribution du GT1 au 6^e RE (2021) : « *Sur des échelles de temps millénaires, les changements climatiques les plus rapides observés au Groenland et dans d'autres régions coïncident avec des changements rapides de CH₄.* » (VOA³⁷⁵)³⁷⁶.

375 « *On millennial timescales, most rapid climate changes observed in Greenland and other regions are coincident with rapid CH₄ changes* ».

376 6^e RE, contribution intégrale du GT1, version du 7 août 2021 adoptée par l'assemblée plénière mais dont l'édition n'était pas finalisée, section 2.2.3.2.2 .

Chapitre 3 – Le *Reste causal* et la communication à « l'intention des décideurs » : Effacement ponctuel puis rebond

Ce chapitre est consacré aux évolutions du Résumés à l'intention des décideurs (RID) de la contribution du GT1, cela tout au long des six Rapports d'évaluation (RE), et du RID du rapport de synthèse, du 3^e RE au 5^e RE. Plus précisément, nous y étudierons l'évolution de la présence du *Reste causal* associé aux scénarios climatiques pour le XXI^e siècle. Nous observerons que ce *Reste* et l'alerte sur une édulcoration des risques par les scénarios ont été quasiment effacés de ces RID, cela à partir du 2^e RE (1995) et jusqu'au 5^e RE (2013-2014), avec un point extrême, le 4^e RE (2007), où l'effacement est total. Cette observation est celle d'un effacement de l'imprévisible, au bénéfice de la seule prise en compte du quantifié que constituent les scénarios. Cet effacement quantophrénique, qui ne bénéficie d'aucune justification scientifique, était le produit du consensus politique (celui de l'Assemblée plénière du GIEC) construit autour de la dynamique science et politique du GIEC. Nous verrons que s'il a pu être pour une grande part levé avec le 6^e RE (2021), l'une des conditions préalables était le déclin du mouvement climato-sceptique et le franchissement d'une étape majeure, à savoir l'intégration, à partir du 5^e RE, de la pleine reconnaissance du réchauffement climatique et de son origine anthropique dans le consensus politique international.

III.3.1 - 1^{er} RE, 1990

III.3.1.1 - Le RID du GT1

En 1990, le RID de la contribution du GT1 au 1^e RE du GIEC alertait, en plusieurs passages, sur l'existence de phénomènes qui n'étaient pas pris en considération par les scénarios. En par-

ticulier, la section *How much do we expect climate to change?*³⁷⁷ informait sur le fait que les rétroactions des GES n'étaient pas prises en compte par les modèles climatiques et donc par les scénarios pour le XXI^e siècle. Auparavant, la section *Greenhouse gas feedbacks*³⁷⁸ présentait une large liste de rétroactions des GES et précisait que chacune d'entre elles pouvait avoir un impact significatif sur les taux de GES dans l'atmosphère. Parmi ces dernières nous avons :

- l'augmentation ou la baisse du bilan net sources/puits des écosystèmes continentaux ;
- la baisse de la capture de dioxyde de carbone par les océans, pour laquelle trois causes possibles étaient présentées : la chimie du dioxyde de carbone dans l'eau de mer, l'activité biologique des eaux de surface, le niveau des échanges de dioxyde de carbone entre la couche supérieure et la couche profonde des océans ;
- l'augmentation des émissions de méthane par les zones humides et les cultures de riz inondées, consécutive aux augmentations de la température et de l'humidité des sols ;
- l'augmentation des émissions de méthane issues du pergélisol ou issues des hydrates de méthane.

En outre, ce paragraphe sur les rétroactions des GES se concluait en ces termes : « *Comme illustré précédemment, les carottes de glace montrent que les concentrations de méthane et de dioxyde de carbone ont changé de la même manière que la température entre les périodes glaciaires et interglaciaires.*

Bien que bon nombre de ces processus de rétroaction soient mal compris, il semble probable que, dans l'ensemble, ils agiront pour augmenter, plutôt que de diminuer, les concentrations de gaz à effet de serre dans un monde plus chaud. » (VOA³⁷⁹).

377 Page XX.

378 Page XVIII.

379 « *As illustrated earlier, ice core records show that methane and carbon dioxide concentrations changed in a similar sense to temperature between ice ages and interglacials.*

Although many of these feedback processes are poorly understood, it seems likely that, overall, they will act to increase, rather than decrease, greenhouse gas concentrations in a warmer world ».

Plus loin, le texte précisait : « *Les sources et les puits naturels de gaz à effet de serre sont sensibles à un changement de climat et peuvent modifier considérablement les concentrations futures. Il semble que, à mesure que le climat se réchauffe, ces rétroactions entraîneront une augmentation globale des gaz à effet de serre d'origine naturelle, plutôt qu'une diminution. Pour cette raison, le changement climatique sera probablement plus important que les estimations données ci-dessus (c'est-à-dire les scénarios).* »³⁸⁰(VOA³⁸¹).

Ainsi, le GIEC mettait l'accent sur le fait que les scénarios constituaient une représentation probablement édulcorée du changement climatique. En outre, ailleurs dans ce RID, il alertait sur la possibilité de « *surprise venant de la complexité du système* »³⁸² et de « *problèmes imprévus et zones d'ignorance* »³⁸³.

Nous notons enfin que, dans la liste ci-dessus, est citée l'activité biologique des eaux de surface comme possible lieu d'une rétroaction climatique positive, laquelle consisterait en une baisse de la capture de dioxyde de carbone. Nous pouvons toutefois noter que, en dehors du réchauffement des eaux de mer, rien n'est dit sur les perturbations de l'environnement du vivant marin et leur possible impact sur la production et la captation de GES. Mais nous étions en 1990, les connaissances et alertes scientifiques en ces domaines étaient bien moins conséquentes que de nos jours. Si bien que nous pourrions situer cette question dans la composante « zone d'ignorance », c'est-à-dire l'Inconnu inconnu, que ce RID a pris en considération.

En conclusion, nous mettons l'accent sur deux aspects de ce RID.

- Le *Reste* associé aux scénarios est exposé dans son intégralité, y compris sa composante « Inconnu inconnu » ; cela de façon explicite et détaillée, sans flou ni ambiguïté.
- La représentation édulcorée du changement climatique que constituent les scénarios est de même exposée de façon explicite, sans flou ni ambiguïté.

380 Page XXVII.

381 « *Natural sources and sinks of greenhouse gases are sensitive to a change in climate, they may substantially modify future concentrations (see earlier section "Greenhouse gas feedbacks") It appears that, as climate warms, these feedbacks will lead to an overall increase, rather than decrease, in natural greenhouse gas abundances For this reason, climate change is likely to be greater than the estimates we have given. ».*

382 Page XIII.

383 Page XXIII.

- Le risque de surprise est présenté, mais sans précision sur son éventuel impact en termes de réchauffement ou de refroidissement du climat.

Enfin, une remarque générale. Dans ce 1^{er} RE, nous trouvons l'emploi du terme *prévision*. Celui-ci sera abandonné dans les RE suivants, au bénéfice du terme *projection*.

III.3.1.2 – La version brève du RID

Pour être complet, nous notons que ce premier RID, qui tenait en 23 pages, présentait en première partie un « Executive Summary » (ES), version brève du résumé qui permettait d'accéder en deux pages aux informations considérées comme essentielles par le GIEC. Deux passages de cet ES étaient en lien avec le *Reste causal* :

1. « *Nos prévisions comportent de nombreuses incertitudes, notamment en ce qui concerne les moments, l'ampleur et les caractéristiques régionales du changement climatique, en raison de notre compréhension incomplète des éléments suivants :*

- *les sources et les puits de gaz à effet de serre, qui influent sur les prévisions des concentrations futures ;*
- *les nuages, qui influencent fortement l'ampleur du changement climatique ;*
- *les océans, qui influencent le déroulé dans le temps et les caractéristiques du changement climatique ;*
- *les calottes glaciaires polaires, qui influent sur les prévisions d'élévation du niveau de la mer.*

*Ces processus sont déjà partiellement compris, et nous sommes convaincus que les incertitudes peuvent être réduites par des recherches supplémentaires. Cependant, la complexité du système signifie que nous ne pouvons pas exclure les surprises.»*³⁸⁴ (VOA³⁸⁵).

384 Page XII.

385 « *There are many uncertainties in our predictions particularly with regard to the timing, magnitude and regional*

patterns of climate change, due to our incomplete understanding of:

- *sources and sinks of greenhouse gases, which affect predictions of future concentrations*
- *clouds, which strongly influence the magnitude of climate change*
- *oceans, which influence the timing and patterns of climate change*

2. « *L'effet du réchauffement sur les processus biologiques, bien que peu compris, peut augmenter les concentrations atmosphériques des gaz à effet de serre naturels* »³⁸⁶ (VOA³⁸⁷).

L'ensemble du RID est un document structuré dans lequel les lecteurs peuvent rapidement trouver les informations portant sur tel ou tel sujet. Le bref résumé en deux pages ne peut prétendre avoir la même richesse. Nous pouvons noter que le risque de « surprise » y est repris, mais, contrairement au RID intégral, l'ensemble du premier extrait de cet ES est neutre, dans le sens où il ne précise à aucun moment si les phénomènes cités penchent plutôt vers plus de réchauffement ou moins de réchauffement. Par contre, le second extrait, sur les processus biologiques, précise que ces derniers sont porteurs d'un risque de réchauffement supplémentaire. Finalement, l'ES alerte bien moins que le RID intégral sur le caractère édulcoré de la représentation du changement climatique portée par les scénarios.

Pour finir, nous précisons que ce 1^{er} RE présentait des scénarios et des chiffres pour le XXI^e siècle auxquels, sauf exception, n'étaient pas associés d'intervalles de confiance. En revanche, tous les facteurs d'incertitudes étaient présentés dans le RID ; ainsi que, bien que de façon plus ramassée, dans l'ES de ce RID.

III.3.2 - 2^e RE, 1995

Trois ans plus tard, en novembre 1995, le RID du GT1 du 2^e RE était approuvé. Il tenait en seulement 5 pages. En ce qui concerne le *Reste causal*, il souffrait d'une rédaction quelque peu floue, voire de contradictions.

• *polar ice sheets which affect predictions of sea level rise*

These processes are already partially understood, and we are confident that the uncertainties can be reduced by

further research. However, the complexity of the system means that we cannot rule out surprises. ».

386 Page XXII.

387 « *The effect of warming on biological processes, although poorly understood, may increase the atmospheric concentrations of natural greenhouse gases* ».

Nous y lisons que « *Le réalisme croissant des simulations du climat actuel et passé par les modèles climatiques couplés atmosphère-océan a renforcé notre confiance dans leur utilisation pour la projection du changement climatique futur. D'importantes incertitudes subsistent, mais elles ont été prises en compte dans la gamme complète des projections de la température moyenne mondiale et de l'évolution du niveau de la mer.* »³⁸⁸ (VOA³⁸⁹). Ainsi, selon ce RID la gamme complète des projections intègre toutes les incertitudes. Le *Reste causal* serait donc vide. Or le 2^e RE, tout comme le RE qui l'a précédé et ceux qui lui succéderont, ne présentait aucun scénario dont le *Reste causal* était vide, loin s'en faut.

D'ailleurs, en ultime conclusion de ce RID et en contradiction avec ce premier extrait, un accent était mis sur le caractère non linéaire du système climatique et sur d'éventuelles « surprises », notamment en cas de hausse rapide des taux de GES dans l'atmosphère : « *Des fluctuations inattendues, rapides et de grande ampleur du système climatique (comme il s'en est produit par le passé) sont difficiles à prévoir de par leur nature même. La future évolution du climat risque donc de nous réserver des "surprises", dues notamment au caractère non linéaire du système climatique. En cas de forçage rapide, les systèmes non linéaires sont particulièrement susceptibles de comportements inattendus. Il est possible de réaliser des progrès en étudiant les processus et les composantes non linéaires du système climatique. On peut citer, parmi ces phénomènes non linéaires, les bouleversements rapides de la circulation dans l'Atlantique Nord et les rétroactions liées aux modifications des écosystèmes terrestres.* »³⁹⁰.

388 Page 5 de la version anglaise. La version officielle française comporte un contre-sens : traduction de 'projection' par 'prédiction'.

389 « *The increasing realism of simulations of current and past climate by coupled atmosphere-ocean climate models has increased our confidence in their use for projection of future climate change. Important uncertainties remain, but these have been taken into account in the full range of projections of global mean temperature and sea level* ».

390 Dernière section : *Les incertitudes restent nombreuses*. Page 7.

III.3.3 - 3^e RE, 2001

Six ans plus tard, le RID de la contribution du GT1 au 3^e RE, malgré un développement en une vingtaine de pages, faisait totalement l'impasse sur le *Reste causal*. Aucun des phénomènes appartenant à ce *Reste* n'était cité. Aucun passage ne laissait entrevoir la possibilité d'une représentation édulcorée du changement climatique dans les scénarios. En outre, rien n'était dit sur le risque de « surprise ».

Il en va quasiment de même du RID du Rapport de synthèse. Toutefois, il nous faut relever deux passages où il est question de phénomènes qui appartiennent au *Reste causal* :

- « *Certains des changements abrupts/non linéaires prévus au sein des systèmes physiques et des sources et puits de gaz à effet de serre pourraient être irréversibles, mais des incertitudes subsistent à propos de certains processus sous-jacents. La probabilité des changements prévus devrait augmenter avec le rythme, l'ampleur et la durée des changements climatiques.* »³⁹¹

- « *D'importants changements d'origine climatique au niveau des sols et de la végétation pourraient se produire et entraîner d'autres changements climatiques à la suite de l'augmentation des émissions de gaz à effet de serre par les végétaux et les sols et de la modification des propriétés des surfaces (albédo, par exemple).* »³⁹²

Cependant, il n'est pas explicitement indiqué que certains de ces phénomènes ne sont pas pris en compte par les projections climatiques pour le XXI^e siècle, i.e. qu'ils se situent dans le *Reste causal*.

III.3.4 - 4^e RE, 2007

Le constat fait ci-dessus sur le RID de la contribution du GT1 au 3^e RE peut être intégralement appliqué, sans aucune modification, au RID de la contribution du GT1 au 4^e RE de 2007, ainsi qu'au RID du Rapport de synthèse

391 Question 4. Page 15.

392 Question 4. Page 16.

III.3.5 - 5^e RE, 2013-2014

Six ans plus tard, en 2013, le RID de la contribution du GT 1 au 5^e RE donne lieu à un timide retour du *Reste causal*, après une absence totale depuis le début du XXI^e siècle. Ce retour se limite à une seule phrase : « *Les scénarios utilisés par le Groupe de travail I sont axés sur les émissions anthropiques et ne prennent pas en compte les évolutions des facteurs naturels, tels que le forçage solaire ou volcanique, ou les émissions naturelles, par exemple de CH₄ et de N₂O.* »³⁹³. Les évolutions des émissions naturelles de CH₄ et de N₂O sont donc citées, mais rien ici dans le propos du GIEC ne précise qu'elles seraient consécutives à l'activité humaine. Pourtant, la grande part, si ce n'est la quasi-totalité des évolutions des émissions naturelles de ces deux GES sont et seront consécutives aux activités humaines. *A priori*, nous pouvons émettre l'hypothèse selon laquelle le qualificatif 'naturelle' associé au substantif 'émission' contribua à ce que certains lecteurs (de nombreux lecteurs ?) aient pu considérer que les évolutions de ces émissions étaient sans lien de causalité avec l'activité humaine, au même titre que celles du « forçage solaire ou volcanique »

Un an plus tard, en 2014, dans le RID du Rapport de synthèse, rien n'est dit sur une possible édulcoration présentée par les scénarios ; rien sur les phénomènes appartenant au *Reste causal*, ni explicitement ni implicitement ; aucune alerte sur d'éventuelles 'surprises'.

III.3.6 - 6^e RE

III.3.6.1 – RID du GT1

En août 2021, le GIEC publia la contribution du GT1 au 6^e RE. Deux passages du RID concernent notre propos. Le premier porte sur les phénomènes causaux, tandis que le second porte sur les événements climatiques peu probables.

Le premier confirme un certain retour du *Reste causal*, mais aussi et surtout, il montre que les scénarios sont porteurs d'une représentation édulcorée du changement climatique. En voici les

³⁹³ RID, DT1, 5^e RE, Encadré RID.1, page 29 (version française).

termes : « *Des réactions supplémentaires des écosystèmes au réchauffement ne sont pas encore totalement incluses dans les modèles climatiques. Il en va ainsi des flux de CO₂ et de CH₄ provenant des zones humides, du dégel du pergélisol et des incendies de forêt, lesquels feraient augmenter encore davantage les concentrations de ces gaz dans l'atmosphère (confiance élevée).* »³⁹⁴ (VOA³⁹⁵).

En ce qui concerne le *Reste causal*, ce RID demeure donc au milieu du gué. En effet, il rend visible une portion de ce *Reste* et alerte ainsi sur une vision édulcorée du changement climatique induite par les scénarios. Dans le même temps, il limite son propos aux « *réactions des écosystèmes au réchauffement* »³⁹⁶ et aux « *flux de CO₂ et de CH₄ provenant des zones humides, du dégel du pergélisol et des incendies de forêt* ». Il omet ainsi deux composantes du *Reste causal*. L'une, constituée de rétroactions au changement climatique, par exemple le développement de population de micro-organismes méthanogène lors de la fonte de glaciers polaires ou encore la fonte d'hydrates de méthane. L'autre, constituée de phénomènes causaux anthropiques qui ne sont pas des réactions au réchauffement, par exemple des réactions des écosystèmes marins à d'autres perturbations anthropiques que le réchauffement. Finalement, ce RID contribue encore à une vision édulcorée du risque climatique.

Le second passage : « *Des résultats peu probables, tels que l'effondrement de la calotte glaciaire, les changements brusques de la circulation océanique, certains événements extrêmes et un réchauffement nettement supérieur à la fourchette très probable du réchauffement futur, ne peuvent être exclus et font partie de l'évaluation des risques* »³⁹⁷ (VOA³⁹⁸).

394 Section B.4.3., page 26.

395 « *Additional ecosystem responses to warming not yet fully included in climate models, such as CO₂ and CH₄ fluxes from wetlands, permafrost thaw and wildfires, would further increase concentrations of these gases in the atmosphere* ».

396 Écosystème est ici vraisemblablement entendu dans le sens restreint d'écosystème terrestre.

397 Section C.3, page 27.

398 « *Low-likelihood outcomes, such as ice sheet collapse, abrupt ocean circulation changes, some compound extreme events and warming substantially larger than the assessed very likely range of future warming cannot be ruled out and are part of risk assessment.* ».

Dans le 6^e RE du GIEC, ‘très probable’ signifie une probabilité supérieure à 90 %. Appliquée à une fourchette, la probabilité de dépasser la borne supérieure de cette fourchette est inférieure à 5 % ; idem pour la probabilité d’être en dessous de la borne inférieure. La fourchette très probable pour chacun des 5 scénarios du 6^e RE est reproduite dans notre annexe 3.

Dans ce second passage, nous remarquons l’emploi de l’expression « nettement supérieur ». Le GIEC n’alerte donc pas seulement sur le fait que, pour un scénario d’émissions de GES donné, le réchauffement pourrait dépasser la borne supérieure de la fourchette des températures (avec une probabilité inférieure à 5%) ; mais il alerte, en outre, sur le fait que ce réchauffement pourrait être nettement supérieur à cette borne supérieure. La présence de ce passage dans le *Résumé à l’intention des décideurs* signifie que, selon le GIEC, ce risque doit être signalé à l’attention de ces derniers.

Ce second passage est complété de cinq items. Les deux premiers d’entre eux concernent plus particulièrement nos travaux.

Le premier porte sur les risques associés à un réchauffement supérieur à la fourchette très probable: « *Si le réchauffement planétaire dépasse la fourchette évaluée comme très probable pour un scénario d’émissions de GES donné, y compris les scénarios de faibles émissions de GES, les changements mondiaux et régionaux dans de nombreux aspects du système climatique, tels que les précipitations régionales, dépasseraient également leurs fourchettes évaluées comme très probables (confiance élevée). Ces résultats à faible probabilité et à fort réchauffement sont associés à des incidences potentiellement très importantes, comme des vagues de chaleur plus intenses et plus fréquentes et de fortes précipitations, et à des risques élevés pour les systèmes humains et écologiques, en particulier pour les scénarios à fortes émissions de GES.* » (VOA³⁹⁹).

Le deuxième alerte sur les risques à faible probabilité d’un réchauffement situé dans la fourchette très probable : « *Des résultats à faible probabilité et à fort impact pourraient se produire*

399 « *If global warming exceeds the assessed very likely range for a given GHG emissions scenario, including low GHG emissions scenarios, global and regional changes in many aspects of the climate system, such as regional precipitation and other CIDs, would also exceed their assessed very likely ranges (high confidence). Such low-likelihood, high-warming outcomes are associated with potentially very large impacts, such as through more intense and more frequent heatwaves and heavy precipitation, and high risks for human and ecological systems, particularly for high GHG emissions scenarios.* ».

à l'échelle mondiale et régionale, même si le réchauffement planétaire se situe dans la fourchette très probable pour un scénario d'émissions de GES donné. La probabilité de résultats à faible probabilité et à fort impact augmente avec les niveaux de réchauffement planétaire (confiance élevée). Des réactions brutales et des points de basculement du système climatique, tels qu'une forte augmentation de la fonte de la calotte glaciaire de l'Antarctique et le dépérissement des forêts, ne peuvent être exclus (confiance élevée) »⁴⁰⁰. (VOA⁴⁰¹).

III.3.6.2 – Une innovation, les 14 points principaux du RE

À côté de la publication du RID, la contribution du Groupe 1 au 6^e RE présente une innovation qui comble le vide laissé par l'abandon, dès le 2^e RE, de l'Executive Summary du RID du 1^{er} RE. Il s'agit de la publication des 14 grands traits ou points principaux du RID. Nous disposons ainsi d'un texte de deux pages, dont la lecture est nettement plus aisée et plus rapide que celle du RID et de ses quelques dizaines de pages. Dans ces deux pages, pas un mot ne porte sur le *Reste causal*. Néanmoins, nous y retrouvons⁴⁰² le second passage cité ci-dessus du RID : « *Des résultats peu probables, tels que l'effondrement de la calotte glaciaire, les changements brusques de la circulation océanique, certains événements extrêmes et un réchauffement nettement supérieur à la fourchette très probable du réchauffement futur, ne peuvent être exclus et font partie de l'évaluation des risques* ».

III.3.7 – Conclusion

400 6^e RE, GT1, RID, section C.3.2, page 27.

401 « *Low-likelihood, high-impact outcomes could occur at global and regional scales even for global warming within the very likely range for a given GHG emissions scenario. The probability of low-likelihood, high-impact outcomes increases with higher global warming levels (high confidence). Abrupt responses and tipping points of the climate system, such as strongly increased Antarctic ice-sheet melt and forest dieback, cannot be ruled out (high confidence).* ».

402 Section C.3 des 14 *Points principaux*.

Le *Reste causal* contient des informations, des données, dont la communication est un indispensable complément à la communication des scénarios. Indispensable pour satisfaire trois exigences :

- appréhender la distance qui sépare les projections climatiques publiées dans les rapports du GIEC de la somme des connaissances scientifiques apportant des éléments d'information sur la trajectoire du climat durant le XXI^e siècle ;
- éclairer la hauteur des risques que fait peser sur l'humanité le changement climatique – alors que les scénarios les édulcorent.
- et, finalement, définir une stratégie politique informée.

Nous avons vu que, en 1990, le RID de la contribution du GT1 au 1^{er} RE exposait largement le contenu du *Reste causal* et remplissait les conditions nécessaires pour satisfaire les trois exigences ci-dessus. Toutefois, contrairement au RID complet, l'Executive Summary, bref résumé en deux pages qui ouvrait le RID, offrait une vision édulcorée du changement climatique.

Cinq ans plus tard, en 1995, le RID de la contribution du GT1 au 2^e RE opérait une rupture. En effet, un seul phénomène du *Reste causal* était cité, à savoir les rétroactions de la biosphère terrestre. De plus, ces rétroactions n'étaient présentées ni comme positives (amplifiant le réchauffement) ni comme négatives, et rien n'indiquait qu'elles n'étaient pas prises en compte dans les scénarios. Cependant, ce RID alertait sur l'imprévisible, les « surprises » ; mais c'était sans en tirer de propos qui puissent inviter, implicitement ou de fait, à une application du Principe de précaution par les nations et les organisations internationales qui l'ont adopté ; en effet pas un mot ne portait sur les risques de dommages graves et irréversibles pour l'humanité et son environnement.

Six ans plus tard encore, en 2001, dans le RID du GT1, 3^e RE, rien n'était dit sur le *Reste causal*, rien sur l'édulcoration que représentent les scénarios, rien sur le risque de « surprise ».

Même constat en 2007, à propos du 4^e RE.

En 2013, dans le RID du GT1, 5^e RE, le *Reste* fait un timide retour. Par ailleurs, rien n'est dit sur l'édulcoration par les scénarios, rien sur le risque de « surprise ».

Huit ans plus tard, en 2021, la contribution du GT1 au 6^e RE opère un semi retour vers la situation du 1^{er} RE. Le *Reste causal* est de retour dans le RID, mais de façon partielle. Le fait que les scénarios édulcorent le risque est exposé, mais dans le même temps ce RID donne lui-même une vision relativement édulcorée du réchauffement. Enfin, un accent est mis sur les risques très improbables situés hors du cadre du niveau de réchauffement présent dans les scénarios, ainsi que sur les risques peu probables situés dans le cadre de ce niveau de réchauffement ; dans les deux cas il s'agit de risques possiblement majeurs devant faire « partie de l'évaluation des risques » ; ce qui peut sembler inviter à la convocation du Principe de précaution.

Dans les contributions complètes du GT1 aux différents RE, nous ne trouvons pas un tel effacement du *Reste causal* et une telle absence d'alerte sur les risques de 'surprises'. En effet, quelque soit le RE considéré, de la première édition à la sixième, un grand nombre de phénomènes appartenant au *Reste causal* sont exposés. Mais, peu de personnes se penchent sur les rapports complets - textes de plusieurs milliers de pages dont la lecture est ardue - hormis certains chercheurs, vraisemblablement des services de certaines armées... Les publications du GIEC les plus importantes au plan politique, ce sont les Résumés à l'intention des décideurs, et dans une bien moindre mesure les Résumés techniques. Ce sont notamment ces résumés dont vont s'emparer, directement ou indirectement (c'est-à-dire en reprenant ce qu'en auront extrait ou retenu d'autres acteurs), de nombreux responsables politiques, la plupart des médias, les ONG..., afin de préciser leur représentation du changement climatique et définir les stratégies à promouvoir ou à déployer pour atténuer ce changement et s'y adapter. Les RID constituent le noyau de la contribution du GIEC au développement d'une dynamique politique. Ils ont contribué et contribuent toujours à la construction et à l'évolution de la représentation du changement climatique par les populations humaines.

Nous n'allons pas ici développer une analyse socio-politique (rapports de forces, processus concrets...) de l'absence, pendant plus de vingt ans, de toute trace dans le RID du GT1 du *Reste causal*, de l'édulcoration par les scénarios et des risques de 'surprises' ; absence suivie de

leur retour à l'occasion du 6^e RE. Nous allons, toutefois, nous référer à quelques témoignages et quelques travaux de recherche. Tout d'abord, Jean-Louis Dufresne⁴⁰³, climatologue et expert du GIEC, apporte un éclairage sur le changement d'objectif du GIEC entre le 5^e et le 6^e RE. Selon lui, dans le 5^e rapport la « *volonté de convaincre* » portait sur « *la réalité du changement climatique* », il s'agissait alors de combattre le climato-scepticisme ; alors que, dans le 6^e rapport, la « *volonté de convaincre* » porte sur « *les conséquences du réchauffement climatique et l'urgence à agir* »⁴⁰⁴. Ensuite, il y a l'article de Michael Oppenheimer et al., daté de septembre 2007, selon lequel : « *L'importance accordée au consensus dans les rapports du GIEC a mis l'accent sur les résultats attendus, qui sont ensuite ancrés par des estimations numériques dans l'esprit des décideurs politiques. La crédibilité générale de la science du changement climatique étant établie, il est désormais tout aussi important que les décideurs comprennent les possibilités plus extrêmes que le consensus peut exclure ou minimiser.* ». (Oppenheimer et al., 2007, p.1505). (VOA⁴⁰⁵). Cet extrait est à replacer dans son contexte, à savoir la publication du 4^e RE du GIEC. Ce 4^e RE est celui où n'apparaît aucune trace du *Reste causal*, ni dans le consensus exprimé dans le RID du GT1 ni dans celui exprimé dans le RID du rapport de synthèse. Plus que jamais, le consensus communiqué par le GIEC à propos du futur climatique se résumait à des 'estimations numériques'. Par ailleurs, Michael Oppenheimer est « *une légende dans le GIEC* » ; « *il a participé aux nombreux ateliers scientifiques qui ont précédé la création du GIEC et à contribuer à tous les cycles d'évaluation dans les Groupes I et II* » (De Pryck, 2022, p.73). Ainsi, cet appel d'Oppenheimer et al. pouvait sembler être entendable et devoir être pris en considération lors de la rédaction du 5^e RE, bien que le cheminement devant mener au consensus reconnaissant pleinement un réchauffement d'origine anthropique n'était pas en-

403 Jean-Louis Dufresne est directeur de recherche au CNRS, membre du Laboratoire de Météorologie Dynamique (LMD) et directeur adjoint de l'Institut Pierre-Simon Laplace (IPSL) dont il est également responsable du Centre de Modélisation du Climat. Il a contribué en tant qu'auteur principal du GT1 au 5^e et 6^e RE.

404 Extraits de la présentation/annonce écrite, par Jean-Louis Dufresne, de son intervention à la séance du 17 septembre 2021 du séminaire *Changement Climatique: Sciences, Sociétés, Politique* co-organisé par le CAK (EHESS-CNRS) et l'ENS (CERES).

405 "The emphasis on consensus in IPCC reports, however, has put the spotlight on expected outcomes, which then become anchored via numerical estimates in the minds of policy-makers. With the general credibility of the science of climate change established, it is now equally important that policy-makers understand the more extreme possibilities that consensus may exclude or downplay."

core arrivé à son terme. Cependant, en 2009, la crédibilité du GIEC était affaiblie par l'incident des courriels du *Climatic Research Unit*, encore appelé *Climategate*, et par des erreurs trouvées dans le 4^e RE (De Pryck, 2022, p.96-97) ; ce qui redonna une certaine vigueur au climato-scepticisme. Si bien que, comme le rappelle Jean-Louis Dufresne, lors du 5^e RE il s'agissait de combattre ce dernier.

Quant aux processus concrets de rédaction des RID, à leur sujet nous nous cantonnons ici à relater les travaux, tels que ceux de Scott Janwood, qui montrent que les auteurs de ces résumés anticipent les difficultés politiques, qui pourraient survenir lors de l'adoption des textes par l'Assemblée plénière, en décidant préalablement de soutenir certaines assertions au niveau des RID et de laisser d'autres assertions au niveau des Rapports techniques ou des Rapports complets, lesquels sont revus moins minutieusement par les délégations des gouvernements nationaux (Janwood, 2020).

III.3.8 - Interprétation et représentation des incertitudes, la rupture du 6^e RE

Le RID de la contribution du GT1 au 6^e RE se démarque des RID des RE précédents par son interprétation des incertitudes. En effet, comme nous l'avons vu, ce dernier RID du GT1 illustre avec des exemples concrets l'impact du cas où « *le réchauffement planétaire dépasserait la fourchette évaluée comme très probable pour un scénario d'émissions de GES donné* ». En outre, y compris dans le cas contraire où le réchauffement resterait dans la fourchette très probable, le RID note que des résultats à *faible probabilité et à fort impact* pourraient se produire, ce qu'il illustre à nouveau par des exemples concrets. Cette rupture avec les RE précédents marque un profond changement du message adressé par le GIEC aux décideurs et plus largement aux populations : celui-ci n'est plus enfermé dans un cadre de quantification, mais intègre du non quantifiable, de l'imprévisible. Pour les organisations qui se référeront authentiquement à ce 6^e RE, il ne sera plus guère possible de définir des politiques climatiques uniquement autour d'objectifs chiffrés de moyen et long termes, mais il s'agira au contraire de définir des stra-

tégies politiques flexibles qui intègrent un processus d'adaptation continue aux évolutions effectives du changement climatique, ainsi qu'aux avancées scientifiques relatives à celui-ci.

De plus, au sujet des événements à faible probabilité et fort impact, dont il est question dans le RID, qu'ils soient situés dans le cadre des niveaux de température des scénarios ou hors de ce cadre, le changement d'approche traverse le rapport dans son ensemble. Ces événements aux incertitudes profondes donnent lieu, dans le rapport intégral du GT1, et non pas dans le RID, à des développements inédits que V. Masson-Delmotte, coprésidente du GT1 durant la rédaction et la publication du 6^e RE, expose en ces termes⁴⁰⁶ : « *Et puis se pose la question, comment on visualise, comment on partage une incertitude profonde.* » ; « *Une éventualité dont la probabilité d'occurrence est faible ou mal connue, mais dont les impacts associés seraient majeurs (est) représentée sous forme de narratif pour un certain nombre d'aspects associés à une incertitude particulièrement marquée* ». Puis elle poursuit : « *On sait que certains secteurs de l'Antarctique peuvent être potentiellement instables. Il est très difficile d'évaluer le niveau de réchauffement ou bien le moment auquel ces instabilités peuvent se déclencher. Le choix a été fait d'aborder cela sous forme de narratif* ».

406 Valérie Masson-Delmotte, première séance du Grand Séminaire IPSL, 31 janvier 2022 :

<https://www.youtube.com/watch?v=ZkwaYw8RMzk&t=4445s>

QUATRIÈME PARTIE

Interprétations et ouvertures

Chapitre 1 - Le *Reste causal*, le quantifiable, l'imprévisible et le Principe de précaution

Préambule

En 2011, dans un ouvrage intitulé *Une société intoxiquée par les chiffres* (Delepouve, 2011), j'écrivais « Aveuglé par la croyance selon laquelle le savoir exprimé dans le langage des mathématiques serait supérieur à tout autre savoir, l'individu se détourne de savoirs indispensables, ne les cultive plus, n'en tient plus compte et perd le sens du réel »⁴⁰⁷. Deux pages plus loin, je poursuivais « Les racines de ce scientisme remontent à l'antiquité grecque, comme l'illustre l'inscription « Que nul n'entre ici s'il n'est géomètre. » qui figurait à Athènes sur le fronton de l'école platonicienne, dénommée l'Académie. Cependant, il ne s'agit pas ici, au détour d'une citation, de proposer une critique à l'égard de l'œuvre des philosophes de la Grèce antique – d'autant que celle-ci présente une diversité de courants ou d'écoles contradictoires –, mais de nommer le point initial d'où les rapports aux savoirs, aux sciences, aux objets et aux relations humaines, évolueront au cours des siècles pour aboutir à l'absurdité de la situation actuelle. »⁴⁰⁸. La description de l'absurdité de la situation actuelle constitue le cœur de cet ouvrage. Elle porte sur l'ensemble des savoirs, dont le savoir scientifique et le savoir d'expertise, ce qui renvoie à notre thèse.

En effet, durant deux décennies, dans les Résumés à l'intention des décideurs le GIEC a publié des scénarios climatiques chiffrés, produits de modèles mathématiques, en omettant de transmettre une partie du savoir indispensable à l'interprétation de ces scénarios, à savoir le contenu du *Reste causal* ; partie sans laquelle ces scénarios peuvent sembler être des prévisions (conditionnées par des trajectoires techno-socio-économiques), bien qu'ils ne soient que des projections qui ne peuvent prétendre représenter le réel.

407 Page 11.

408 Page 13.

Si de tels scénarios étaient diffusés de cette manière par des scientifiques, cela présenterait une contradiction avec les règles qui fondent la communication scientifique. Celle-ci doit impérativement présenter les domaines de validité de ses résultats, c'est-à-dire les conditions de leur validité ; l'une de ces conditions est ici un *Reste causal* dont la dimension négligeable serait scientifiquement démontrée.

En revanche, si nous considérons la construction de la dynamique science, expertise et politique qui est au cœur de la mission du GIEC, nous pouvons émettre l'hypothèse que nous avons là non pas une contradiction, une absurdité, mais un cheminement au service d'un objectif politique. L'efficacité de ce cheminement a bénéficié d'un contexte où règne une croyance en une puissance de l'instrument mathématique et en une capacité de représentation et de prévision du savoir quantifié qui dépassent nettement les réalités respectives de cette puissance et de cette capacité. Elle a de plus bénéficié, et c'est indissociablement lié, de la vanité selon laquelle, paraphrasant Max Weber, « *nous pourrions maîtriser toute chose par la prévision* ».

IV.1.1. Considérations autour du *Reste*

Nous avons déjà présenté plusieurs exemples de *Reste*, c'est-à-dire de ce qui n'est pas pris en considération dans une théorie, une modélisation, un agrégat ou un calcul. Il y a le *Reste causal* associé aux modèles et aux scénarios climatiques, bien sûr. Nous avons aussi abordé, brièvement, le *Reste* associé à des théories économiques, à propos desquelles J.M. Keynes avait alerté sur la menace d'un excès de mathématisation reposant sur des « postulats simplificateurs ». Enfin, dans notre chapitre I.3, nous avons rencontré le *Reste causal* des scénarios du Rapport Meadows.

Ce sous-chapitre commence par l'exposé de deux nouveaux exemples de *Reste* qui illustrent la portée de cette notion. Tout d'abord nous aborderons celui, causal, auquel renvoie l'expression *Toute chose étant égale par ailleurs*, fréquemment utilisée dans divers domaines scientifiques, et notamment en sciences économiques. Puis suivra l'exposé du *Reste* associé à l'*Empreinte écologique*, notion aujourd'hui majeure de la communication sur l'environnement global. Enfin, nous développerons une réflexion sur le *Reste causal* en tant qu'outil disponible pour étudier le

lien entre science et politique, mais aussi pour enrichir ou perfectionner ce lien ou encore comme outil de la décision politique et en particulier comme outil de la décision d'un appel ou non au Principe de précaution, pour les pays et les organisations qui ont intégré ce principe dans leur corpus législatif ou réglementaire.

IV.1.1.1 - Toute chose étant égale par ailleurs

Certaines disciplines, dont les sciences économiques, utilisent fréquemment l'expression *Toute chose étant égale par ailleurs*, laquelle signifie que, pour les besoins de la démonstration théorique ou de la modélisation, des phénomènes dont les variations ou les évolutions pourraient impacter le phénomène réel étudié, sont considérés comme figés. Ces variations ou évolutions sont alors des phénomènes causaux qui ne sont pas pris en considération. Ensemble, elles constituent le *Reste causal* induit par l'expression *Toute chose étant égale par ailleurs*.

Nous notons que cette expression exprime la reconnaissance de l'existence de ce *Reste causal* et de son importance possiblement non marginale. Par ailleurs, l'usage de cette expression s'accompagne toujours d'une mise en visibilité explicite des phénomènes causaux pris en considération, c'est-à-dire situés à l'extérieur du *Reste causal*. Nous pourrions donc y voir une certaine rigueur scientifique. Cependant, dans de nombreuses situations les phénomènes causaux situés à l'intérieur du *Reste causal* sont en interactions complexes avec l'objet étudié et avec les phénomènes causaux pris en compte dans la démonstration ou le modèle ; si bien que la démonstration et son résultat ou la simulation du modèle ne procurent pas d'information sur la mécanique réelle de l'ensemble constitué de cet objet et des phénomènes causaux pris en compte, car la réalité dynamique de cet ensemble restreint est indissociable du *Reste causal*.

IV.1.1.2 – L'empreinte écologique

En juillet 2002, la revue PNAS de l'Académie nationale des sciences des États-Unis d'Amérique publia un article rédigé par les créateurs de l'*empreinte écologique* (Wackernagel et al., 2002). Cette dernière, sa méthodologie et ses conclusions y étaient exposées. En voici le résumé : « *La durabilité exige de vivre dans les limites de la capacité de régénération de la*

biosphère. Pour tenter d'évaluer dans quelle mesure l'humanité satisfait à cette exigence, nous utilisons les données existantes pour traduire la demande humaine sur l'environnement en surface requise pour la production de nourriture et d'autres biens, ainsi que pour l'absorption des déchets. Nos comptes indiquent que la demande humaine pourrait bien avoir dépassé la capacité de régénération de la biosphère depuis les années 1980. Selon cette évaluation préliminaire et exploratoire, la charge de l'humanité correspondait à 70 % de la capacité de la biosphère mondiale en 1961, et est passée à 120 % en 1999. » (VOA⁴⁰⁹). Pour calculer cette empreinte écologique, une unité de mesure commune a été choisie, l'hectare biologiquement productif. Elle permet de mettre le nombre d'hectares requis par l'activité humaine effective en regard du nombre d'hectares disponibles sur la planète. Notons de suite que certains déchets ne sont pas biologiquement absorbables, dégradables. Aucune surface ne pourra permettre leur « absorption ». La méthodologie de l'empreinte écologique prend en compte cette difficulté de la façon la plus simple, c'est-à-dire en ne prenant pas en considération ces déchets, en les renvoyant dans le *Reste causal* qui lui est associé. En effet, l'empreinte écologique repose explicitement sur six hypothèses, dont voici les deux premières :

« - Il est possible de suivre la plupart des ressources que l'humanité consomme et des déchets qu'elle produit.

- La plupart de ces flux de ressources et de déchets peuvent être mesurés en termes de surface biologiquement productive nécessaire pour maintenir ces flux (les flux de ressources et de déchets qui ne le peuvent pas sont exclus de l'évaluation). » (VOA⁴¹⁰), (Wackernagel et al., 2002, p. 9266).

409 « Sustainability requires living within the regenerative capacity of the biosphere. In an attempt to measure the extent to which humanity satisfies this requirement, we use existing data to translate human demand on the environment into the area required for the production of food and other goods, together with the absorption of wastes. Our accounts indicate that human demand may well have exceeded the biosphere's regenerative capacity since the 1980s. According to this preliminary and exploratory assessment, humanity's load corresponded to 70% of the capacity of the global biosphere in 1961, and grew to 120% in 1999. ».

410 « - It is possible to keep track of most of the resources humanity consumes and the wastes humanity generates.

- Most of these resource and waste flows can be measured in terms of the biologically productive area necessary to maintain these flows (those resource and waste flows that cannot be excluded from the assessment). ».

Ainsi, si la planète était dévastée par les déchets nucléaires, par les déchets plastiques ou encore par les redoutables Polychlorobiphényles (PCB), l'*empreinte écologique* de l'humanité pourrait dans le même temps connaître une amélioration, c'est-à-dire que le nombre d'« hectares biologiquement productifs requis par l'activité humaine » pourrait diminuer.

Par ailleurs, l'article publié par PNAS précise que l'empreinte carbone, l'une des composantes de l'empreinte écologique, ne prenait en considération que six domaines :

- les cultures,
- l'élevage,
- l'exploitation et la récolte forestières,
- la pêche,
- l'évolution des surfaces bâties ou consacrées aux infrastructures (transports, barrages électriques...),
- la combustion des énergies fossiles.

À propos du dernier de ces items, l'article précise : « *La combustion des combustibles fossiles rejette du CO₂ dans l'atmosphère. Notre méthode sera ici de calculer la surface consommée en estimant la surface productive nécessaire pour séquestrer le carbone émis. Étant donné que les océans absorbent 35 % des émissions de CO₂ issues des combustions fossiles, nous prenons en compte seulement les 65 % restant (...).* » (VOA⁴¹¹). Puis les auteurs notent que le taux de CO₂ de l'atmosphère absorbé par les océans devrait baisser et que des puits de carbone pourraient voir leur activité s'inverser et ainsi devenir des sources de carbone. Quant aux émissions des autres GES dues à l'exploitation de combustibles fossiles, elles ne sont pas comptabilisées et se trouvent donc renvoyées dans le *Reste causal*.

Depuis le lancement de l'*empreinte écologique*, et encore aujourd'hui, seul le CO₂ est considéré dans le calcul de l'*empreinte carbone*⁴¹². Les émissions anthropiques de méthane ne sont pas prises en compte, bien que, nous l'avons vu, le surplus de méthane dans l'atmosphère dû aux activités humaines soit responsable, à lui seul, d'environ 45 % du réchauffement climatique.

411 « *Burning fossil fuel adds CO₂ to the atmosphere. We calculate the area requirement by estimating the biologically productive area needed to sequester enough carbon emissions to avoid an increase in atmospheric CO₂. Because the world's oceans absorb about 35% of the CO₂ emissions from fossil fuel combustion (27, 28), we account only for the remaining 65% (...)* ».

Finalement, le *Reste* associé à l'*empreinte écologique* est composé d'une multitude d'éléments : les déchets nucléaires et plus largement tout ce qui provient des énergies non fossiles ; l'ensemble des déchets non biodégradables ; les émissions anthropiques de GES hormis le dioxyde de carbone ; etc, etc. Si bien que les auteurs de l'article et créateurs de l'*empreinte*, conscients de limites et de biais de leur méthode, précisaient dans leur article que l'*empreinte* permettait de définir des conditions nécessaires de durabilité, mais aucunement des conditions suffisantes, et affirmaient néanmoins qu'elle permettait de comparer différents choix technologiques, économiques, etc., sur la base de leurs conséquences sur la seule *empreinte écologique*.

L'année suivante, en 2003 était publiée la première édition de l'empreinte écologique de chaque nation.

Poursuivant notre observation, nous notons que le contenu du *Reste* de l'*empreinte écologique* se double d'autres biais majeurs qui illustrent les travers de la quantophrénie, voire les aberrations auxquelles celle-ci peut mener. Par exemple, nous pourrions avoir une nette diminution de l'*empreinte écologique*, suffisante pour repasser dans une situation de durabilité, du moins selon la mesure de cette empreinte, sans pour autant satisfaire aux exigences posées par le changement climatique. Nous limitons notre raisonnement au seul CO₂. Selon l'empreinte écologique, en 2021, le 29 juillet était le jour de dépassement du niveau de durabilité⁴¹³. Si bien qu'en divisant par deux le niveau de chaque élément de cette empreinte, le 31 décembre nous n'aurions pas encore dépassé le niveau de durabilité. Pourtant, il existe aujourd'hui un consensus scientifique pour affirmer que, de nos jours, pour assurer la durabilité climatique il faudrait au plus vite réduire à zéro les émissions nettes de CO₂ d'origine humaine, et non pas simplement diviser par deux les émissions anthropiques de ce GES. L'atmosphère terrestre est déjà saturée en dioxyde de carbone et en méthane ; c'est-à-dire que, en raison de ces déchets carbonés accumulés dans l'atmosphère, le climat est déjà dérégulé et porteur de dommages majeurs et bien souvent irréversibles pour l'humanité et la biosphère. Toute nouvelle émission

412 Voir la définition de cette notion : <https://data.footprintnetwork.org/?ga=2.141751410.1579154414.1662538037-490612295.1662538037#/abouttheData> . Vu le 7 septembre 2022.

413 <https://www.wwf.fr/jour-du-depassement> . Vu le 3 mai 2022.

de GES nous éloigne davantage de la durabilité. La question n'est pas aujourd'hui de savoir quel serait, en cette année 2023, le jour de dépassement de la quantité d'émissions de CO₂ autorisée pour maintenir la durabilité climatique, mais elle est de mettre au plus vite un terme aux émissions anthropiques de ce GES. Dès le 1^{er} janvier au soir, nous avons déjà rejeté trop de GES dans l'atmosphère. En ce premier quart du XXI^e siècle, chaque année le jour de dépassement du niveau de durabilité climatique est le 1^{er} janvier. Bien sûr, l'exigence selon laquelle dès le 1^{er} janvier il ne faudrait plus émettre de GES ne pourra être satisfaite en un ou deux ans, ni même en une décennie. Néanmoins, il s'agit d'une exigence fondée scientifiquement, mais une exigence que tend à cacher une *empreinte écologique* qui édulcore la gravité du changement climatique.

Plus largement, l'empreinte écologique présente, comme tout agrégat qui mélange des choses de natures très diverses, le risque de cacher une part de l'essentiel et de contribuer à une perte de sens du réel.

Cependant, la diffusion et le succès planétaires de l'*empreinte écologique* n'ont cessé de croître et cet agrégat a aujourd'hui acquis une place de tout premier rang dans l'espace médiatique, voire dans le monde politique⁴¹⁴. Mais, la plupart des médias et nombre d'organisations de défense de l'environnement présentent l'empreinte écologique sans informer sur sa nature réelle ni, en particulier, sur le *Reste* associé. S'appuyant sur le scientisme quantophrénique ou étant habitées par lui, elles cultivent le mythe d'une *empreinte écologique* outil de la quantification de la durabilité. Un exemple notoire est celui du WWF, dont voici des propos extraits de son site ; c'était en l'an 2022⁴¹⁵ :

« *L'empreinte écologique mesure la quantité de surface terrestre bioproductive nécessaire pour produire les biens et services que nous consommons et absorber les déchets que nous produisons.*

Imaginez que vous êtes un Robinson Crusôé isolé sur une île déserte : quelle devrait être la taille de votre île (terre, lagon et mer accessible compris) pour vous permettre de vivre en au-

414 Voir par exemple <https://www.footprintnetwork.org/about-us/our-history/>

415 https://wwf.panda.org/fr/wwf_action_themes/modes_de_vie_durable/empreinte_ecologique/. Vu le 3 mai 2022.

tarcie de façon durable et répondre à vos besoins en nourriture, chauffage, matériaux de construction, air pur, eau potable, absorption de déchets ? Cette surface représente l'empreinte écologique de notre Robinson Crusoe. »

Puis le WWF poursuit en des termes dont la précision est à la hauteur de la simplification extrême et trompeuse opérée :

« Grâce à cet outil, nous sommes capables de quantifier la durabilité : nous pouvons évaluer la quantité existante de sols et d'espaces marins « bio-productifs » sur la Terre (la superficie capable de nous fournir en nourriture, carburant ou poisson, par exemple), et par conséquent calculer ce que serait un « juste partage » des ressources pour chaque être humain.

Nous sommes également capables de calculer grâce à cet outil la quantité de ressources naturelles consommée par différents pays, personnes ou entreprises, et ainsi évaluer si leur consommation rentre à l'intérieur de ce "juste" partage. Il y a environ 12 milliards d'hectares de sols et d'espaces marins bio-productifs – ce qui correspond environ à une allocation de 2 hectares par être humain. Pourtant, le mode de vie d'un Américain moyen requiert environ 10 hectares bio-productifs. En d'autres mots, si chacun avait le même mode de vie qu'un Américain moyen, la population mondiale aurait besoin de 5 planètes bio-productives afin de nourrir, habiller et héberger chacun d'entre nous. ».

Quant au Global Footprint Network, la structure qui élabore et édite chaque année pays par pays un bilan de l'*empreinte écologique*, la tonalité de son site Web est proche de celle du site du WWF, mais très éloignée de celle de l'article de recherche de 2002 rédigé par les créateurs de l'*Empreinte*. Cette tonalité y est présente dès la définition de cet agrégat : *« Mesure de la surface de terre et d'eau biologiquement productive dont un individu, une population ou une activité a besoin pour produire toutes les ressources qu'il consomme et pour absorber les déchets qu'il produit, en utilisant les technologies et les pratiques de gestion des ressources en vigueur. L'empreinte écologique est généralement mesurée en hectares globaux. Le commerce étant mondial, l'Empreinte d'un individu ou d'un pays inclut les terres ou les mers du monde*

entier. Sans autre précision, l'empreinte écologique fait généralement référence à l'empreinte écologique de la consommation. ». ⁴¹⁶(VOA⁴¹⁷).

IV.1.1.3 - Lien avec la notion d'incertitude

L'intervalle d'incertitude associé à l'estimation quantifiée ou à la mesure quantifiée d'une grandeur donnée peut résulter de raisons diverses : tout d'abord une ou des imprécisions inhérentes à l'utilisation d'outils et de méthodes de mesure ; ensuite une incertitude générée par un processus mathématique de calcul ; enfin une incertitude consécutive au recours à l'informatique. Des méthodes mathématiques permettent de combiner ces différentes imprécisions ou incertitudes et d'en déduire un intervalle d'incertitude associé à l'estimation ou à la mesure de la grandeur donnée. Enfin, l'approche peut être stochastique ; des intervalles de confiance se substituent alors aux intervalles d'incertitude, ce qui est le plus souvent le cas dans les rapports du GIEC.

Le *Reste causal* que nous convoquons dans le déroulé de notre thèse est générateur d'une incertitude qui se situe dans une autre catégorie. Il s'agit d'une « *incertitude cruciale* », c'est-à-dire une incertitude qui n'est pas d'ordre technique, correspondant à l'inexactitude, ou méthodologique, correspondant au manque de fiabilité, mais d'ordre épistémologique, correspondant à la "*frontière de l'ignorance*" (Silvio O. Funtowicz et Jerome R. Ravetz, 1993, p.742-743). Elle échappe à toute possibilité de quantification et de mesure par des intervalles d'incertitude ou des intervalles de confiance.

Le *Reste causal* associé aux scénarios publiés par le GIEC rassemble les phénomènes causaux de l'évolution future du climat qui ne sont pas pris en compte dans la construction des scénarios

⁴¹⁶ https://data.footprintnetwork.org/?_ga=2.141751410.1579154414.1662538037-490612295.1662538037#/abouttheData

⁴¹⁷ « A measure of how much area of *biologically productive land and water* an individual, population, or activity requires to produce all the resources it consumes and to absorb the waste it generates, using prevailing technology and resource management practices. The Ecological Footprint is usually measured in *global hectares*. Because trade is global, an individual or country's Footprint includes land or sea from all over the world. Without further specification, Ecological Footprint generally refers to the Ecological Footprint of consumption. Ecological Footprint is often referred to in short form as Footprint. ».

du GIEC ni dans la construction des intervalles de confiance associés à ces scénarios. Chaque phénomène situé dans ce *Reste causal* est porteur d'une incertitude climatique qui n'est pas intégrée dans ces intervalles de confiance. Un grand nombre de phénomènes de ce *Reste causal* sont interdépendants car, notamment, ils constituent des lieux de rétroactions au réchauffement climatique. En outre, ces rétroactions sont le plus souvent positives. Si bien que ce *Reste causal* présente une incertitude globale qui, en raison du risque d'emballage climatique, vaut bien plus que la somme des incertitudes directement liées à chacun des phénomènes qui le composent. Enfin, notons qu'ici l'incertitude porte sur des représentations d'un phénomène futur, le changement climatique pour la suite du XXI^e siècle ; elle est indissociable de l'imprévisibilité de ce phénomène.

Au delà de la seule question climatique, l'étude d'un *Reste causal* associé à une estimation de l'évolution future d'une grandeur ou associé à une représentation du futur d'un phénomène, est essentielle à l'étude de l'incertitude associée à cette estimation ou à cette représentation, ainsi qu'à l'étude de l'imprévisibilité de la grandeur ou du phénomène en question.

Cependant, n'allons pas réduire la portée de la notion de *Reste causal* à ses seuls liens avec l'incertitude et l'imprévisible. Ce *Reste* a aussi, et peut-être d'abord, vocation à développer, autant que faire se peut, une intégration de l'ensemble des causes d'un phénomène dans l'étude de ce dernier. La portée en serait un enrichissement de la capacité à représenter et saisir un phénomène donné et, corrélativement, à agir avec pertinence et efficacité sur ce phénomène et sur les phénomènes sur lesquels il agit ou avec lesquels il interagit.

IV.1.1.4 – Un pont entre science et politique

IV.1.1.4.1 – Approche quantifiée du futur d'un phénomène en évolution ou à venir et *Reste causal* associé sont indissociables

L'approche quantifiée du futur d'un phénomène donné en évolution ou à venir laisse sur le côté une partie des phénomènes causaux de ce phénomène. Cette partie, qui peut être vide, négligeable ou à l'opposé très conséquente, nous l'avons dénommée *Reste causal*. Notre étude des projections du changement climatique pour le XXI^e siècle publiées par le GIEC, couramment nommées scénarios climatiques, illustre cette question, et montre que la part d'imprévisible du *Reste causal* associé à ces scénarios est suffisamment importante pour rendre vaine toute tentative de représentation ou d'estimation du changement climatique au long du XXI^e siècle à l'aide de ces seuls scénarios. Toute communication de ces scénarios doit nécessairement être accompagnée d'une communication qui présente le *Reste causal* associé, dès lors qu'il s'agit de contribuer à une représentation ou une approche scientifiquement fondée du changement climatique au long du XXI^e siècle ou qu'il s'agit d'alimenter la connaissance sur laquelle reposera la définition d'une politique climatique. Ce constat, fait pour le changement climatique, est généralisable à toute approche ou étude scientifique du futur d'un phénomène réel en évolution ou à venir. La généralisation de l'application de cette règle réduirait notablement le risque de circulation d'une représentation erronée.

Enfin, dans le cadre de la science post-normale, nous considérons que l'évaluation de la prise en considération du *Reste causal* dans la communication scientifique, dans les conclusions d'expertise ou encore dans la décision politique, sont essentielles à la démarche d'assurance qualité de l'information scientifique et à l'évaluation de l'expertise scientifique et des politiques publiques.

IV.1.1.4.2 – Le *Reste causal* et le Principe de précaution

Pour les besoins de notre thèse, nous avons pris pour définition du Principe de précaution l'énoncé de ce dernier issu du préambule de la Constitution de la République française : « Lorsque la réalisation d'un dommage, bien qu'incertaine en l'état des connaissances scientifiques, pourrait affecter de manière grave et irréversible l'environnement, les autorités publiques veillent, par application du principe de précaution et dans leurs domaines

d'attributions, à la mise en œuvre de procédures d'évaluation des risques et à l'adoption de mesures provisoires et proportionnées afin de parer à la réalisation du dommage. ». Pour les responsables politiques qui se réfèrent au Principe de précaution, la décision d'appliquer ou non ce dernier repose donc sur l'évaluation ou l'estimation de trois critères auxquels correspondent respectivement trois mots clés : incertitude, gravité, irréversibilité.

Comment définir une politique intégrant une part d'imprévisible à laquelle sont associés des risques graves et irréversibles ? En particulier, comment définir une politique climatique qui prenne pleinement en considération le risque d'un emballement du réchauffement climatique dont les dommages pourraient être irréversibles et particulièrement graves pour l'humanité ? Comment définir une politique climatique, alors qu'il est impossible de déterminer scientifiquement, y compris sous une forme stochastique, quel serait le scénario climatique associé à tel ou tel profil d'émissions de GES ? Bien sûr, il y a les projections climatiques du GIEC. Mais celle-ci ne donnent pas les scénarios climatiques effectivement associés à tel ou tel profil d'émissions de GES, cela en raison de l'ampleur du *Reste causal* qui leur est associé ; *Reste* dont, au demeurant, il faut considérer la hauteur de l'imprévisibilité, qui plus est dans un contexte de bifurcation inédite de l'hyper-complexe système-Terre. Si bien qu'il y a des choix collectifs et politiques à réaliser, des stratégies à élaborer, des décisions concrètes à prendre, qui ne reposent ni sur les seuls scénarios chiffrés ni sur les seules certitudes scientifiques, mais qui relèvent d'une appréciation d'une situation qui doit être nourrie de la connaissance scientifique des phénomènes appartenant au *Reste causal* associé aux scénarios chiffrés. Face à l'incertitude scientifique, ce *Reste causal* est une clé de l'évaluation des risques de dommages graves et irréversibles pour l'humanité et son environnement terrestre. Finalement, que ce soit face au changement climatique ou à d'autres problèmes qui présentent une part déterminante d'incertitude, d'inconnu, d'imprévisible, le *Reste causal* est un outil dont peuvent disposer les experts et les décideurs politiques pour évaluer si les conditions de l'application du Principe de précaution sont vérifiées ; du moins au sein des nations et organisations qui ont adopté ce principe.

IV.1.1.4.3 - Conclusion

Finalement, nous constatons que la publication et la diffusion du contenu du *Reste causal* devrait être un indispensable complément à la publication et à la diffusion des scénarios climatiques portant sur le XXI^e siècle. Cet indispensable complément ne répond pas uniquement à une exigence de rigueur et d'authenticité scientifiques, il est aussi et peut-être d'abord politique. En effet, il met en exergue la nécessité de faire appel au Principe de précaution, par les nations et organisations qui ont adopté ce principe. Plus généralement, il met en exergue la nécessité de mettre en œuvre un processus stratégique d'adaptation continue (A. Magnan, 2013) aux évolutions effectives du changement climatique et de ses phénomènes causaux, ainsi qu'aux évolutions des connaissances scientifiques relatives à ce changement et aux phénomènes causaux qui en déterminent l'évolution, et il contient des informations indispensables à la définition des politiques d'atténuation du risque climatique et d'adaptation au réchauffement global.

Ce qui est dit ici à propos du changement climatique est applicable à tout phénomène ou objet dont l'évolution future ou l'émergence à venir dépend de phénomènes causaux dont au moins certains d'entre eux sont largement imprévisibles, que cet imprévisible se situe au niveau de leur ampleur, de leur temporalité ou de l'effectivité de leur émergence. Aussi, nous suggérons que la publication d'une approche quantifiée d'un objet ou d'un phénomène en évolution ou potentiellement à venir soit systématiquement accompagnée de la publication du *Reste causal* associé. Dans une perspective de science post-normale, cette publication pourrait être considérée comme un élément central de l'assurance qualité de l'information scientifique.

IV.1.2 – Le Principe de précaution et le changement climatique

IV.1.2.1 – Anticiper le non quantifié, l'imprévisible

Une erreur consisterait à considérer que tant que le changement climatique effectif se poursuit selon une trajectoire conforme aux projections quantifiées du GIEC, alors ces projections pourraient constituer la boussole des politiques climatiques, et que, dès que ce constat ne serait plus

établi, les politiques climatiques devraient trouver d'autres repères. Cette erreur reposerait sur une absence de prise en considération du *Reste Causal* associé à ces projections/scénarios, plus précisément sur l'absence de prise en compte de phénomènes causaux dont l'expression n'est pas encore présente, hormis éventuellement à un niveau négligeable, mais se situera ou pourrait se situer dans un futur connu ou au contraire incertain. Nous restreindrons ici notre propos à, parmi ces phénomènes causaux, ceux dont l'expression est imprévisible dans sa temporalité, son ampleur, voire son effectivité.

Parmi ces phénomènes, nous en analyserons successivement quatre, à savoir les sources naturelles de méthane de notre chapitre III.2. Tout d'abord, de façon plus développée que pour les sources suivantes, voyons les émissions de méthane des mares thermokarst du pergélisol. Pour ce faire, nous observerons – sous une forme simplifiée - le délai qui peut séparer le moment de l'expression d'un premier phénomène donné (en l'occurrence les émissions anthropiques de GES) du moment de l'expression d'un second phénomène donné consécutif au premier (les émissions de méthane des mares thermokarst). Dans un premier temps, il y a les émissions anthropiques de GES et l'élévation des taux de GES dans l'atmosphère, par exemple de X %. Dans un deuxième temps, la température de l'atmosphère à la surface de la Terre s'élève de Y degrés Celsius. Cette élévation de Y d°C n'est pas instantanée, elle prend un certain temps. Un délai apparaît entre le moment où les taux de GES ont augmenté de X % et celui où la température terrestre a augmenté de Y d°C. Dans un troisième temps, sous l'effet du réchauffement terrestre, le pergélisol se déstabilise, des mares thermokarst se forment et dans la partie profonde de celles-ci des populations d'archées méthanogènes se développent. Ces populations ne se développent pas en un jour. En outre, il est par la suite nécessaire que l'eau de la mare soit saturée en méthane pour que ce dernier s'échappe en quantité importante dans l'atmosphère. Ainsi, un délai se présente entre le moment où la température terrestre a suffisamment augmenté pour que ce phénomène d'émission de méthane puisse s'enclencher et prendre de l'ampleur, et le moment où ce phénomène d'émission de méthane est enclenché et acquiert effectivement de l'ampleur. Finalement, deux délais successifs séparent le moment des émissions anthropiques suffisantes de GES et le moment – largement imprévisible – où une conséquence de ces émissions anthropiques consiste en des émissions conséquentes de méthane dans l'atmosphère par des mares thermokarst contribuant à une divergence entre l'évolution du taux de méthane effectif et celle projetée par les scénarios du GIEC. Éviter que ne se produise l'activation d'une telle rétro-

action positive (les émissions massives de méthane issues du pergélisol), nécessite d'anticiper et de réduire les émissions anthropiques de GES en cause non pas au moment de cette activation, mais à un moment antérieur séparé du moment potentiel d'activation par une durée au moins égale à la somme des deux délais que nous venons d'identifier.

Ce qui est vrai ici pour les émissions de méthane dues à la fonte du pergélisol, l'est pour de nombreuses rétroactions positives dont la science ne sait prévoir ni l'ampleur ni la temporalité. Il en va ainsi des émissions de méthane issues des hydrates d'un fond marin. Une fois que l'augmentation du taux de GES suffisante est atteinte, il y a le délai du réchauffement suffisant de l'air, puis le délai du réchauffement suffisant de l'eau du fond marin considéré (suite à la hausse générale de la température des océans ou/et suite aux changements des courants marins) et enfin le délai de la pénétration suffisante de l'énergie calorifique dans le fond marin. Il en va de même des émissions de méthane issues de la fonte des glaciers polaires. Une fois l'augmentation suffisante du taux de GES atteinte, il y a le délai du réchauffement suffisant du lit du glacier et de la présence suffisante d'eau liquide, puis le délai du développement de population de micro-organismes méthanogènes. Enfin, dernier exemple que nous aborderons, il y a l'Inconnu inconnu des adaptations du micro vivant marin aux perturbations anthropiques de son environnement, où le réchauffement climatique n'est qu'une des causes, et pour lesquelles les délais qui séparent les perturbations anthropiques d'éventuelles émergences ne sont pas prévisibles.

Face au caractère scientifiquement incertain de ces rétroactions qui pourraient affecter de manière grave et irréversible l'humanité et son environnement, et face aux délais qui précèdent leur activation, au sein des nations et des organismes qui ont adopté le Principe de précaution, il revient aux responsables politiques de faire appel à ce dernier - ce qui est toujours un acte d'anticipation face à l'imprévisible.

IV.1.2.2 - Définitions

Selon Didier Bourguignon (2015) « *Le principe de précaution vise à permettre aux décideurs de prendre des mesures de protection lorsque les preuves scientifiques relatives à un danger pour l'environnement ou la santé humaine sont incertaines et que les enjeux sont importants.*

Apparu dans les années 1970, ce principe a depuis lors été inscrit dans des traités internationaux sur l'environnement, dans le Traité sur le fonctionnement de l'Union européenne, et dans l'ordre juridique interne de certains États membres. (...). Les définitions du principe varient selon les acteurs, les experts et les juridictions, avant tout en fonction du degré d'incertitude permettant une action de la part des autorités. ».

Illustrant la diversité des degrés d'incertitude, nous présentons deux approches. La première, compatible avec un degré d'incertitude élevé, est intégrée au préambule de la Constitution de la République française ; nous l'avons retenue pour notre thèse. La seconde, à faible degré d'incertitude, est intégrée au texte fondateur de la CCNUCC.

- Nous avons vu, lors de notre introduction, que selon le préambule de la Constitution de la République française : « *Lorsque la réalisation d'un dommage, bien qu'incertaine en l'état des connaissances scientifiques, pourrait affecter de manière grave et irréversible l'environnement, les autorités publiques veillent, par application du principe de précaution et dans leurs domaines d'attributions, à la mise en œuvre de procédures d'évaluation des risques et à l'adoption de mesures provisoires et proportionnées afin de parer à la réalisation du dommage. ».*

- Selon la CCNUCC : « *Il incombe aux Parties de prendre des mesures de précaution pour prévoir, prévenir ou atténuer les causes des changements climatiques et en limiter les effets néfastes. Quand il y a risque de perturbations graves ou irréversibles, l'absence de certitude scientifique absolue ne doit pas servir de prétexte pour différer l'adoption de telles mesures »⁴¹⁸.*

IV.1.2.3 – De la version CCNUCC (1992) et de l'abandon actuel

En 1979, le rapport Charney de l'Académie américaine des sciences, *Carbon Dioxide and Climate : a Scientific Assessment*, alertait sur la nécessité d'anticiper, en des termes d'une grande clarté : « *A wait-and-see policy may mean waiting until it is too late.* »⁴¹⁹. Dès lors, qui plus est après 1987 et les trois articles présentant les résultats de Vostok, les conditions étaient réunies

418 Article 3.3 de la CCNUCC.

419 Extrait de l'avant propos de Verner E. Suomi, Président du Climate Research Board.

pour convoquer le Principe de précaution : en effet, un faisceau d'éléments scientifiques confortait l'hypothèse d'un réchauffement d'origine anthropique dont l'ampleur devrait marquer le XXI^e siècle. Si la certitude scientifique sur l'existence de ce réchauffement restait à acquérir, d'année en année l'incertitude était de moins en moins grande. Dans ce contexte, en 1992 était adopté le texte fondateur de la CCNUCC. Trois ans plus tard, en 1995, dans un texte intégré au 2^e RE⁴²⁰ du GIEC, l'Assemblée générale de ce dernier adoptait une position en faveur de l'application du Principe de précaution « *en cas d'absence de certitude scientifique absolue* », cela dans les termes de l'extrait ci-dessus du texte fondateur de la CCNUCC.

L'emploi du terme *absolue* dans l'expression « *en cas d'absence de certitude scientifique absolue* » est à situer dans le contexte de la première moitié des années 1990. Il y avait alors une quasi certitude scientifique sur l'effectivité des futurs changements climatiques d'origine anthropique aux conséquences néfastes majeures et irréversibles, mais pas de certitude absolue. L'enjeu politique était d'éviter que cela ne se traduise par l'inaction.

Cette expression de la CCNUCC « *l'absence de certitude scientifique absolue ne doit pas servir de prétexte* », n'est plus pertinente dans la situation actuelle. En effet, aujourd'hui la certitude scientifique absolue d'un changement climatique d'origine anthropique aux conséquences graves et irréversibles est acquise, autant qu'elle puisse l'être. Cependant, d'autres incertitudes règnent et vérifient les conditions d'un appel au Principe de précaution. Elles portent sur des phénomènes causaux du changement climatique présentant des risques de perturbations graves et irréversibles que nous retrouvons dans le *Reste causal* des scénarios publiés par le GIEC. Dès son premier RE (1990), celui-ci alertait sur l'incertitude associée à de tels phénomènes. Toutefois, certains d'entre eux sont absents de ses rapports. D'autres y sont abordés ; l'éventualité qu'ils se manifestent de façon significative d'ici la fin du XXI^e siècle y est alors le plus souvent estimée comme étant « improbable », c'est-à-dire d'une probabilité située dans l'intervalle 34 % - 0 %. Vu la gravité et l'irréversibilité des conséquences, le risque ne peut être négligé. L'appel au Principe de précaution serait donc fondé, du moins dans sa version compatible avec un haut niveau d'incertitude, inscrite dans le préambule de la Constitution française.

420 2^e RE, Document de synthèse des informations scientifiques et techniques relatives à l'interprétation de l'article 2 de la convention-cadre des nations unies sur les changements climatiques,

Cependant, le Principe de précaution n'est pas appliqué actuellement par les politiques face au changement climatique. En effet, un usage abusif des chiffres et des mathématiques altère la pensée de l'imprévisible et le gouvernement de la complexité (Delepouve, 2011 ; Supiot, 2015 ; David Demortain, 2019). Nous sommes « À une époque où l'on se tourne de plus en plus souvent vers les modèles et vers la simulation pour aborder la complexité et aider à la décision (...) » (Botta et al., 2011). Dans ce contexte, les scénarios du GIEC répondent à la demande politique de repères quantifiés qui possèdent un niveau de précision suffisant pour être le fondement de la définition politique d'objectifs chiffrés de moyen-long terme tels que, à l'horizon 2050, le *facteur deux* des années 2000 auquel s'est aujourd'hui substituée la neutralité carbone doublée d'une réduction consistante des émissions anthropique de GES avant 2030. Or, ces scénarios, sur lesquels reposent ces objectifs de moyen-long terme et de plus court terme, ne prennent pas en compte des phénomènes causaux qui possèdent un haut niveau d'*incertitude*, mais aussi des caractères de *gravité* et d'*irréversibilité*, si bien que ces scénarios ne sont finalement que des projections qui ne peuvent donner de légitimité scientifique aux objectifs politiques que nous venons de citer. À ces projections est associé un *Reste causal* qui invite, nous l'avons vu, à appliquer le Principe de précaution et, par conséquent, à définir et appliquer des politiques d'atténuation du changement climatique plus ambitieuses, plus exigeantes, que celles qui, dans les meilleurs des cas, se dessinent actuellement sur la base des scénarios 1,5°C du GIEC et visent notamment l'objectif de neutralité carbone vers 2050.

IV.1.2.4 – Un processus stratégique

Dès 1979 et la publication du rapport Charney, les connaissances scientifiques étaient suffisantes pour alerter les politiques, convoquer le Principe de précaution et amorcer une transition afin d'écartier le risque d'un réchauffement climatique global aux conséquences majeures et irréversibles pour l'humanité. Depuis, une quarantaine d'années se sont écoulées. Les enjeux n'ont cessé de croître ; en particulier, un risque s'est précisé, celui d'un emballement des rétroactions positives débouchant sur une bifurcation du système climatique. Dans le même temps, la mise en œuvre des transformations nécessaires pour contenir ce changement climatique est restée largement insuffisante (Delepouve et Bocquet, 2020, p.144).

Selon un document adopté « mot à mot » en décembre 1995 par l'assemblée plénière du GIEC, « il reste des incertitudes sur ce qu'il est utile de connaître pour juger de ce qui constitue une perturbation anthropique dangereuse du système climatique et des mesures à prendre pour éviter de telles perturbations. La littérature indique cependant qu'il existe dans la plupart des pays de vastes possibilités de mesures "sans regrets"⁴²¹ et que le risque de dommages nets dus à l'évolution du climat, la répugnance pour le risque et le principe de précaution justifient des mesures allant au-delà d'une politique "sans regrets". Le problème n'est pas de définir aujourd'hui la meilleure politique pour les 100 ans à venir, mais de choisir une stratégie prudente et de l'adapter ultérieurement en fonction des nouvelles informations disponibles. »⁴²². Ce propos a 27 ans, mais il est toujours d'actualité, car les incertitudes restent majeures. Si bien que l'objectif de neutralité carbone vers 2050 associé à une baisse consistante des émissions de GES dès la présente décennie serait à concevoir comme un objectif flexible à atteindre, c'est-à-dire un objectif modulable, destiné à être modifié avec le temps selon les évolutions effectives du système Terre et selon le développement des connaissances relatives à ce système.

Une autre option pourrait reposer sur le constat que la hauteur de l'imprévisibilité scientifique du changement climatique ne permet pas la détermination d'un niveau de concentration de GES qui empêche ou semblerait devoir empêcher toute perturbation anthropique dangereuse du système climatique. Cette option pourrait consister à définir politiquement des objectifs de niveau de concentration des GES à court et moyen termes, par exemples à 5, 10 et 15 ans, avec pour objectif général de réduire aussi vite que possible les émissions anthropiques de GES et, dans le respect d'une relation prudente avec les équilibres du système Terre et de sa biosphère, développer des puits de GES. L'information scientifique contribuant à la définition de ces objectifs de court et moyen termes comporterait de façon centrale le constat scientifique de l'importance de l'inconnu, de l'imprévisible et du non quantifiable qui caractérisent certains phénomènes au fort potentiel d'impact sur le changement climatique. Enfin, si cette information scientifique in-

⁴²¹ La définition de l'expression « sans regrets » est donnée par le GIEC, en note de bas de page de la section 6.6 du même document : « Les mesures "sans regrets" sont celles dont les avantages, tels que les économies d'énergie et la réduction de la pollution sur le plan local ou régional, sont au moins égaux à leur prix pour la société, indépendamment des avantages apportés par l'atténuation des incidences de l'évolution du climat. On les appelle parfois mesures "utiles en tout état de cause" ».

⁴²² 2^e RE, Document de synthèse des informations scientifiques et techniques relatives à l'interprétation de l'article 2 de la convention-cadre des nations unies sur les changements climatiques, section 8.2.

tégrait des scénarios climatiques pour le XXI^e siècle, alors elle les accompagnerait de la publication de leur *Reste causal*.

Finalement, à la *planification* des politiques climatiques, notion succinctement présentée dans le document du GIEC de 1995 (confer section II.1.4.3) dont une application se dessine aujourd'hui autour de l'objectif de neutralité carbone en 2050, une alternative pourrait être un *processus stratégique*, notion plus flexible dont un aspect cardinal serait l'adaptation continue. Toutefois, fixer politiquement des objectifs d'émission de GES pour le court et le moyen terme (5, 10 ou 15 ans) ouvrirait à nouveau la question d'une planification. Mais il s'agirait alors de la planification d'une simple étape d'un processus stratégique qui lui porterait sur le long terme. Cependant, même à propos du chemin suivi vers des objectifs de court et moyen termes, se pose la question du choix de la conception de la transition, une planification ou un processus stratégique d'adaptation aux diversités locales et aux nécessaires appropriations par les populations (Paul Antoine A.F., 2016), ou encore un mixte entre les deux.

Chapitre 2 - Interactions entre politique, expertise et recherche

IV.2.1 – Une coconstruction science et politique au service d’une mobilisation politique

Selon Valérie Masson-Delmotte (2022)⁴²³, « *chaque rapport est une coconstruction (entre scientifiques et représentants des États)* » et « *à chaque fois, tout au départ on écoute les attentes exprimées par les différents pays pour réfléchir à la structuration des rapports.* ». Puis, elle présente quelques exemples d’attentes du politique exposées lors de la préparation du 6^e Rapport d’évaluation, dont celles de mettre « *un fort focus sur l’information climatique à l’échelle régionale, là où elle est importante pour l’analyse des risques et pour l’adaptation* » et sur les conséquences de long termes, au-delà du siècle. Finalement, selon V. Masson-Delmotte, les rapports du GIEC sont des « *documents assez uniques du fait de ce processus de coconstruction* », conçus « *de manière à éclairer des choix.* ». Ainsi, les Rapports d’évaluation du GIEC sont des rapports d’expertise, conformément au nom donné au GIEC (Groupe d’experts intergouvernemental sur l’évolution du climat), et non pas des documents dont la vocation serait d’exposer l’état général des connaissances scientifiques sur le changement climatique. Aussi, nous l’avons vu dans notre deuxième partie, la singularité du GIEC va au-delà de la coconstruction d’une expertise. Le GIEC est le lieu privilégié de la coconstruction d’une dynamique science et politique dont la finalité est une mobilisation politique internationale en vue de contenir le changement climatique. Telle est la mission première du GIEC.

423 V. Masson-Delmotte, première séance du Grand Séminaire IPSL, 31 janvier 2022 :

<https://www.youtube.com/watch?v=ZkwaYw8RMzk&t=4445s> (± 16mn).

L'importance, voire la primauté, accordée à la dimension internationale de la nécessaire mobilisation politique est illustrée en France par la loi de programme du 13 juillet 2005 fixant les orientations de la politique énergétique. En effet, nous y lisons : « « *En outre, cette lutte (contre le réchauffement climatique) devant être conduite par l'ensemble des États, la France soutient la définition d'un objectif de division par deux des émissions mondiales de gaz à effet de serre d'ici à 2050, ce qui nécessite, compte tenu des différences de consommation entre pays, une division par quatre ou cinq de ces émissions pour les pays développés.* ». Cette loi ne contraint pas le gouvernement français à viser le *facteur 4* sur son territoire, mais à « soutenir » et promouvoir le *facteur 2* au plan international. Il ne s'agit donc pas d'un engagement de la politique intérieure de la France, mais d'un engagement de sa politique internationale.

Par ailleurs, en France le GIEC est au cœur de l'outillage institutionnel convoqué pour construire la mobilisation politique internationale et nationale. Ceci est illustré, nous l'avons vu, par la promotion du *facteur 2* par le Premier Ministre français, Jean-Pierre Raffarin, devant l'assemblée plénière du GIEC tenue à Paris les 19 et 20 février 2003, puis par la référence faite au GIEC dans des documents du gouvernement⁴²⁴. Enfin, plus récemment, en 2018 la France a fourni plus de 50 % des recettes du GIEC⁴²⁵, notamment afin de pallier l'absence de financement par les États-Unis en 2017, puis la quasi absence en 2018.

La mobilisation internationale en vue de contenir le changement climatique requiert des consensus politiques internationaux. Le GIEC joue un rôle central dans ce qui s'avère être un processus stratégique de construction de ces consensus ; ceci est illustré dans notre sous chapitre III.3.1, consacré aux évolutions du RID de la contribution du GT1 aux RE. Nous y voyons que ce RID a connu durant deux décennies une restriction et une édulcoration de son contenu qui ne présentaient aucune raison scientifique, mais qui, au contraire, s'écartaient d'une information scientifique authentique car elles consistaient en un exposé tronqué des connaissances scientifiques relatives au devenir du changement climatique durant le XXI^e siècle - notamment en un effacement du *Reste causal* associé aux scénarios. En revanche, durant ces

424 Voir les sections de [III.1.1.6](#) à [III.1.1.8](#).

425 <https://apps.ipcc.ch/eventmanager/documents/75/260720220715-Doc.%202020-%20IPCC%20Programme%20and%20Budget.pdf>

deux décennies, les Rapports d'évaluation dans leur intégralité et leurs RID se sont progressivement approchés de la reconnaissance pleine et entière de l'existence d'un réchauffement climatique d'origine anthropique. Autrement dit, durant ces deux décennies, au sein de l'Assemblée plénière du GIEC, à l'occasion de chaque nouveau Rapport d'évaluation une nouvelle étape était franchie par les représentants des gouvernements vers un consensus sur cette reconnaissance pleine et entière. Enfin, lorsque ce premier consensus a été acquis, la restriction et l'édulcoration du contenu du RID du GT1 ont été très nettement atténuées et un second consensus a été acquis sur l'accent mis sur l'imprévisible et les risques associés.

La période de restriction et d'édulcoration du RID du GT1, texte adopté ligne par ligne par les représentants des gouvernements, n'ayant pas de raison scientifique, nous pouvons conjecturer une raison politique : ne pas bloquer le processus de construction d'un consensus politique reconnaissant de façon pleine et entière le changement climatique d'origine anthropique. Nous pouvons ainsi parler d'une période où une volonté d'un repli stratégique au sein du GIEC, se serait notamment traduite en cette restriction et cette édulcoration des RID du GT1.

Enfin, il nous faut considérer ce repli stratégique, et plus largement l'ensemble du processus de construction d'une reconnaissance pleine et entière du changement climatique d'origine anthropique, sur le plan de la dynamique science et politique qui est au cœur de l'innovation institutionnelle que constitue le GIEC. Cette dynamique a été nourrie, durant la période allant du 1^{er} au 6^e RE (1990 – 2021), d'avancées majeures réalisées par les sciences relatives au changement climatique, dont, notamment, au début des années 2000, la confirmation par les modèles de l'existence d'un changement climatique d'origine anthropique ou encore la découverte de nouveaux phénomènes appartenant au *Reste causal anthropique*⁴²⁶. Enfin, nous notons que la traduction de ces avancées scientifiques majeures en termes de représentation du changement climatique par les responsables politiques et plus généralement par les populations, a été favorisée par l'accroissement du nombre et de l'intensité des événements climatiques extrêmes ou atypiques.

426 Confer partie III chapitre 2.

IV.2.2 – L’impact du GIEC sur la recherche : une normalisation, un cadre, une motivation politique

IV.2.2.1 – Approche générale

Le GIEC est une institution dont la mission est une expertise au service de la décision et de l’action politiques. Il ne s’agit pas d’une institution de recherche et le GIEC ne mène pas de recherche par lui-même. Le cœur de notre thèse porte sur cette expertise et non pas sur la recherche en elle-même. Toutefois, nous avons abordé des aspects de la modélisation climatique en elle-même, et avons pointé l’usage de la *moyenne démocratique* pour construire des projections sur la base des résultats de plusieurs modèles. Dans ce sous-chapitre, nous allons revenir sur cette moyenne, sur le GIEC qui a pu en favoriser l’usage, et plus largement nous allons aborder l’influence du GIEC sur la recherche. Il s’agira, pour l’essentiel, de relater des travaux de recherche qui ont mis en lumière des aspects de cette influence et ainsi de noter que, si la sphère politique exerce une influence sur le travail d’expertise du GIEC (dont elle est coproductrice), elle exerce aussi, via le GIEC ou via d’autres voies, une influence sur la recherche relative au changement climatique. Cette influence va au-delà de l’orientation de la recherche et du choix des objets de recherche, et au-delà d’un rôle de catalyseur de recherche, mais peut aussi s’exercer sur la méthode suivie par les climatologues et peut avoir des effets normalisateurs, voire s’imposer comme un cadre.

IV.2.2.2 – En France, le cadre normatif du GIEC

En 2006, le Comité national français du changement global (CNFCG) constatait que « *dans le cadre de la préparation du prochain rapport du GIEC à paraître en 2007, et à la demande de la Mission Interministérielle sur l’Effet de Serre (MIES), avec le soutien des organismes de recherche (CNRS, CEA, Météo-France), la communauté climatique française vient de réaliser un exercice de simulation de l’évolution du climat sans précédent. C’est en effet la première fois qu’elle participe à la réalisation de l’ensemble des simulations de scénarios recommandés par*

le GIEC pour servir de base à l'évaluation des changements climatiques futurs.»⁴²⁷ Un cadre issu du GIEC et relayé par le politique et les directions des organismes de recherche était ainsi fixé. Nous notons ici le rôle du politique dans la diffusion au sein de la recherche française d'une certaine focalisation sur les scénarios du GIEC ; lesquels font alors école et cadrent des travaux de recherche dans les laboratoires français du Centre national de la recherche scientifique (CNRS), du commissariat à l'énergie atomique (CEA) et de Météo-France.

IV.2.2.3 – La moyenne démocratique, coopération et pression du GIEC

En 2015, Anouk Barberousse, philosophe des sciences, présentait une influence du GIEC sur la recherche au plan international, en particulier en faveur de l'usage de la *moyenne démocratique* : « *La compétition fait progresser les modèles, mais il y a aussi une collaboration entre eux. Assez récemment, avec le quatrième rapport du GIEC, on a commencé à faire des statistiques multimodèles, en prenant les résultats de plusieurs modèles. L'intention est d'aboutir à des résultats meilleurs que ceux des modèles nationaux et, sans d'ailleurs qu'on sache très clairement pourquoi, c'est ce qui se produit. Sans doute aurait-on pris conscience de ce phénomène sans la pression du GIEC, mais elle a certainement accéléré et intensifié les choses. (...) Mais les résultats sont meilleurs, sans que les raisons soient très claires. Si les choix pouvaient être représentés par des seuils répartis uniformément sur une barre, cela aurait clairement un sens de faire une moyenne. Mais ce n'est pas du tout de cette manière que se présentent les différences entre modèles climatiques*⁴²⁸. » (Barberousse, 2015, p.127). Nous voyons ici que la *moyenne démocratique* a été utilisée sous « *la pression du GIEC* », ce qui a permis de découvrir la qualité des résultats ainsi obtenus. Nous notons que l'évaluation de cette qualité des résultats bénéficie, lorsque ceux-ci sont relatifs au passé, de la collecte de données du passé. Par contre, l'évaluation de la qualité des résultats relatifs au futur ne bénéficie évidemment pas

427 Extrait de l'article *Le réchauffement climatique dans les scénarios futurs : les nouveaux résultats des modèles français*, publié par la Lettre du changement global, n°19, 19 mai 2006.

https://www.cnrs.fr/cw/dossiers/dosclim1/biblio/pigb19/08_rechaufement.htm

428 Pour une présentation des biais de la méthode de la moyenne démocratique appliquée aux modèles climatiques, voir notre sous-chapitre II.2.3 -La *moyenne démocratique*.

d'une telle collecte. Seules des considérations de cohérence interne entre ces résultats et de compatibilité de ces derniers avec les théories qui font référence permettent une certaine évaluation ; alors même que ces théories ne sont confortées par aucune observation ni aucune expérience situées dans le futur, ce qui, dans un contexte de bifurcation d'un système hyper-complexe porteur d'émergences, d'inédits et d'imprévisible, peut présenter une certaine faiblesse.

IV.2.2.4 – La motivation politique des climatologues et l'influence du politique sur la recherche

Anouk Barberousse (2015, p.130) s'arrête par ailleurs sur le rôle et la motivation politiques des climatologues dans le contexte créé par le GIEC, et finalement dans le contexte de la dynamique science et politique de cette institution internationale : *« Ce qui est sûr, c'est que les climatologues ont à l'esprit l'existence du GIEC quand ils travaillent. Prenons le modèle climatique français. Tous les membres des différents laboratoires de l'institut Pierre-Simon Laplace savent que leur travail va devenir des morceaux du rapport du GIEC. Leur travail s'inscrit dans la compétition scientifique normale, mais il y a une première spécificité : ils savent que leur travail, au niveau mondial, va se retrouver dans les rapports du GIEC. La deuxième spécificité réside dans le fait qu'ensuite, il va falloir convaincre les dirigeants politiques. Le GIEC inscrit l'activité des climatologues – de la science pure et très complexe dans sa réalité quotidienne et concrète – dans un contexte politique. Tous les gros laboratoires sont conscients de cela. Cela fait une grosse différence par rapport à des laboratoires dont le travail n'a aucune répercussion politique et sociale directe. »*

Toujours en 2015, Amy Dahan et Hélène Guillemot (2015, p.8) exposaient une présentation générale des impacts ou influences du GIEC sur la recherche relative au changement climatique : *« En bref, le GIEC ne se contente pas de rassembler des travaux : il participe à la recomposition du champ de recherches, orchestre un consensus, favorise certaines visions ; il a un rôle actif, voire performatif. Le régime du changement climatique est le lieu d'une hybridation des dynamiques scientifiques et politiques. (...) Des sociologues des sciences ont également mis en*

évidence des éléments de coconstruction entre science et politique dans les pratiques mêmes de modélisation du climat, montrant par exemple que certains choix des climatologues – comme la technique dite des ajustements de flux intervenue au moment du couplage des modèles atmosphériques avec les océans – ont résulté d’une anticipation des attentes des politiques et d’une volonté de produire des connaissances directement utiles. ».

Plus largement, selon Amy Dahan et Stefan Aykut (2014, p.50), au-delà du seul GIEC la relation entre science et politique a eu des impacts sur la recherche relative au climat : « *Tant l’organisation du champ scientifique du climat que les relations entre les diverses disciplines qui y participent ont subi en retour l’influence du processus politique : priorité absolue à la volonté d’établir le constat d’un réchauffement global, distinction hiérarchique entre la communauté des modélisateurs et celle de l’évaluation des impacts impliquant une asymétrie des moyens mis à leur disposition, organisation top-down des recherches, etc. En bref, les concepts scientifiques globaux et le traitement politique global (dans les arènes des COP et le processus onusien) se sont mutuellement renforcés* ». Si ce propos porte sur la dynamique science et politique, nous y trouvons aussi le primat de la modélisation sur les autres domaines de la recherche relative au changement climatique, au détriment de ces autres domaines et, pour ce qui concerne le futur du climat, au bénéfice d’un savoir quantifié qui masque l’imprévisible et une part possiblement conséquente du réel.

IV.2.2.5 – Des divergences discrètes au sein de la communauté des climatologues

Les climatologues ne parlent pas d’une seule et même voix. Parmi eux, des appréciations, des opinions et des approches divergentes coexistent ou ont coexisté. Il en allait ainsi à propos de la *technique des ajustements de flux* que pointaient A. Dahan et H. Guillemot (2015, p.8). À ce sujet, nous pouvons lire l’article *Adaptation aux attentes politiques dans la modélisation du changement climatique* de Shackley, Risbey, Stone et Wynne (1999, p.445) : « *Nous avons fait valoir qu’il existe différentes "cultures" de modélisation MCG (Modèle de circulation générale)*

avec des différences d'opinion concernant les ajustements de flux⁴²⁹. Nous avons identifié une approche " pragmatique ", dans laquelle les MCG étaient utilisés pour des simulations du changement climatique, généralement pour des évaluations scientifiques de l'effet de serre anthropique destinées aux politiques. Les ajustements de flux font partie intégrante de cette approche. En revanche, les "puristes" se méfient des ajustements de flux, qu'ils considèrent comme susceptibles de masquer les erreurs du modèle, d'influencer la variabilité du modèle et d'entraîner un certain excès d'optimisme ou d'autosatisfaction à l'égard des améliorations des modèles, et ils ont émis des réserves quant à l'hypothèse de linéarité qui sous-tend l'utilisation des ajustements de flux. » (VOA⁴³⁰). De telles divergences ont pu être tues, afin de ne pas donner de grain à moudre au camp des climato-sceptiques (Dahan et Guillemot, 2015, p.9). Elles existaient néanmoins et pouvaient être conséquentes : « *Le fait que la plupart des scientifiques spécialistes du changement climatique s'accordent à dire que l'interprétation contraire (celle selon laquelle il n'existerait pas de changement climatique d'origine anthropique) est douteuse ne signifie pas que les scientifiques spécialistes du climat n'ont pas de divergences d'opinion entre eux. Ces divergences sont souvent subtiles, mais, à notre avis, elles concernent des questions essentielles et peuvent apporter à la science et à la politique des idées que le conflit public et sa forme binaire occultent.* » (Shackley et al., 1999, p.414). (VOA⁴³¹).

429 Les MCG modélisent l'atmosphère et les circulations au sein de l'atmosphère. Les ajustements de flux portent sur les flux entre l'atmosphère et d'autres composantes du système-Terre, par exemple entre l'atmosphère et les océans.

430 « *We have argued that there are different 'cultures' of GCM modelling with differences in opinion concerning flux adjustments. We identified a 'pragmatist' approach, in which GCMs were being used for climate change simulations, usually for policy-oriented scientific assessments of the anthropogenic greenhouse effect. Flux adjustments (and other short-cuts such as the spin-up of ocean models with artificial boundary conditions) are part and parcel of this approach. By contrast, . Those with the purist approach were suspicious of flux adjustments as potentially covering-up model errors, influencing the model's variability, and leading to complacency in model improvements, and they entertained concerns about the linearity assumption behind the use of flux adjustments.* ».

431 « *Yet agreement among most climate change scientists that the contrarian interpretation is dubious does not imply that climate scientists entertain no differences of opinion among themselves. Such differences are often subtle, but in our view they concern key issues and may yield insights for both science and policy which the public conflict and its binary form obscure.* ».

Cette situation a prévalu au moins jusqu'au début des années 2010, (H. Guillemot, 2014, p.341).

IV.2.2.6 - Conclusion

Notamment animée par l'objectif de contribuer au développement d'une mobilisation politique internationale face au changement climatique, l'influence de la sphère politique⁴³² s'est exercée au-delà du seul GIEC et de son expertise, au-delà de l'auto-limitation de l'expression des divergences scientifiques, pour aller jusqu'aux méthodes des travaux scientifiques de modélisation du climat en passant par une place privilégiée accordée à ces travaux.

IV.2.3 - Une dynamique science et société hors GIEC, le projet ESM2025

La dynamique science et politique autour du changement climatique ne se situe pas exclusivement au sein du GIEC. Le 1^{er} juin 2021 un nouveau projet européen de modélisation du système Terre a été lancé. Il s'agit du projet ESM2025, coordonné par le Centre national de recherches météorologiques (CNRM), lequel est une unité mixte de recherche Météo-France – CNRS. Le 5 novembre 2021, Météo France en publia une présentation sur son site⁴³³. Nous y trouvons l'ambition de penser et concevoir ce projet comme un lieu au service de - et en interaction avec - les parties prenantes des politiques climatiques, et comme un outil approfondissant les liens et les connaissances des liens entre activités économiques, actions publiques et évolutions du changement climatique. En voici un extrait :

432 Nous rappelons que nous entendons par sphère politique l'ensemble des acteurs du champ politique ainsi que l'ensemble des enjeux, motivations, croyances, finalités, projets et programmes politiques. Une motivation politique chez un chercheur se situe donc dans la sphère politique.

433 <https://meteofrance.fr/actualite/actualite-de-meteo-france/de-nouveaux-modeles-de-systeme-terre-pour-dessiner-les-futurs-climatiques> , vu le 9 janvier 2022.

« Le projet vise enfin à mettre en cohérence les modèles macro-économiques (qui font les scénarios) et les modèles climatiques (qui font les projections). Nous allons ainsi injecter des connaissances sur les mécanismes physiques et chimiques dans les trajectoires macro-économiques afin de rendre les projections futures plus réalistes.

Nous espérons qu'ensemble les nouveaux modèles, les nouvelles projections et les nouvelles connaissances (tous trois résultats du projet ESM2025) viendront soutenir les services climatiques européens et les évaluations du GIEC, et donc contribuer à l'élaboration de l'action publique dans la mise en œuvre de l'Accord de Paris. En effet, à partir de ce socle de connaissances et d'outils, ESM2025 compte servir d'incubateur pour les actions en faveur du climat et de l'Accord de Paris.

C'est donc pour cela que nous souhaitons intégrer et impliquer, dès le début du projet, des parties prenantes clés que nous avons identifiées en amont. L'idée est de codévelopper avec ces mêmes parties prenantes des connaissances qui seront pertinentes et utiles pour le développement de politiques solides en faveur du climat et d'une société future décarbonée et résiliente aux changements environnementaux. En bref, nous voulons, avec ce projet, favoriser l'assimilation et l'appropriation de ces connaissances clés sur le climat par les parties prenantes tout en fournissant des informations essentielles à l'appui des rapports internationaux d'évaluation du climat, des politiques d'atténuation et d'adaptation au changement climatique, etc.

Dans le même but, ESM2025 vise aussi à développer des activités et du matériel éducatif et pédagogique sur le climat pour s'adresser plus spécifiquement aux jeunes citoyens européens qui seront les acteurs de demain. »

Ainsi, en lien avec l'élaboration de connaissances, ce projet présente une vocation de pédagogie, de recherche participative (avec des parties prenantes clés) et de recherche action (incubateur pour les actions), le tout visant à enrichir, conforter et soutenir les évaluations du GIEC et les politiques climatiques, notamment européennes.

Chapitre 3 - Propositions de résumés alternatifs aux RID

IV.3.1 – D’autres outils que les scénarios du GIEC pour exposer les risques futurs

Les projections climatiques construites grâce aux modèles font partie des outils disponibles pour explorer les risques futurs relatifs au changement climatique. Ainsi, dans le rapport 1,5°C de 2018, une différence significative de niveau de risque entre les scénarios 1,5°C et 2°C a été mis en exergue. Cela a immédiatement eu un impact politique mondial, nous l’avons vu dans la section II.3.3.5 intitulée *Une mobilisation et des objectifs nationaux déployés internationalement*.

Cependant, d’autres outils d’exploration des risques existent. L’un d’entre eux est l’étude du *Reste causal* associé à ces mêmes projections. En effet, ce *Reste* rassemble des phénomènes qui présentent le risque d’occasionner un emballement climatique, mais ils ne sont pas pris en considération par les modèles. Si bien que l’étude de ce *Reste causal* constitue un outil disponible pour explorer les risques futurs, et toute communication des scénarios climatiques devrait être complétée par celle du contenu du *Reste causal* associé.

Par ailleurs, le RID de la contribution du GT1 du 6^e RE a innové en présentant sous une forme narrative certains risques : voir nos sous-chapitres III.3.6 et III.3.8. La forme narrative est un puissant outil de communication des résultats de l’exploration scientifique des risques. Elle peut prendre la forme d’un texte, d’images, d’un film... Sa réalisation peut résulter de la rencontre des compétences de scientifiques, d’écrivains, de peintres, de photographes, de réalisateurs... Elle permet de communiquer l’essentiel ou des parts essentielles de la connaissance scientifique relative au changement climatique, sans se perdre dans des contenus chiffrés, techniques et froids qui ne parlent pas à une large part des humains. Encore faut-il que des experts scientifiques du sujet abordé soient étroitement associés à la réalisation de la narration. Cette question de la présentation narrative, ici rapidement survolée, offre des perspectives de recherche au-delà

de la thèse, par exemple des recherches actions contribuant au développement de l'écriture et de la diffusion de narrations.

IV.3.2 – Première approche et quelques principes

Le GIEC a été conçu de telle manière que les politiques sont présents tout au long du processus d'élaboration de ses rapports, et tout particulièrement dans la finalisation et l'adoption des Résumés à l'intention des décideurs. Ainsi, les RID résultent d'un processus qui se situe au croisement de l'expertise scientifique et du politique et s'inscrivent dans, et contribuent à, une dynamique de mobilisation scientifique et politique internationale. Dans ce contexte, les RID mettent Le *Reste causal* associé aux scénarios climatiques du XXI^e siècle en invisibilité partielle, parfois totale. Quant aux rapports du GT1 dans leur version intégrale, ils présentent un état des connaissances scientifiques relatives au changement climatique qui, sur la plus grande part des questions (des exceptions sont présentées dans notre chapitre III.2), est fidèle à la production scientifique et fait « *apparaître éventuellement les divergences, les incertitudes ou une dispersion des résultats* » (Aykut et Dahan, 2014, p.77).

Dans ce contexte, la question de rédactions alternatives de résumés des contributions du GT1 aux RE du GIEC peut être posée. Ces résumés alternatifs viseraient notamment à mettre en visibilité totale le *Reste causal*, ou *a minima* la partie du *Reste causal* présente dans le rapport intégral. Pour ce faire, ces résumés ne seraient pas élaborés par le GIEC, mais par d'autres institutions ou d'autres groupes. Ils ne se substitueraient pas aux RID du GIEC, car ces derniers tiennent une place indispensable au développement de la dynamique politique internationale face au changement climatique, mais rempliraient un rôle complémentaire. Ils répondraient à l'objectif de diffuser des synthèses concises des rapports complets qui ne gomment aucun des aspects majeurs du changement climatique. Ainsi, sur la base des rapports complets, ces résumés mettraient en visibilité les limites de la connaissance scientifique, les incertitudes, l'inconnu, l'imprévisible, ainsi que les risques d'emballement du changement climatique. Leur vocation serait de rendre accessible l'état de la science relative au changement climatique, tant auprès des décideurs politiques ou économiques que des médias, des ONG, des syndicats, mais aussi auprès de l'ensemble des scientifiques, de toutes les disciplines, et enfin auprès de toute

personne qui souhaiterait s'informer sur la question. Ils répondraient à une volonté de diffuser la production de la recherche scientifique aussi authentiquement que possible.

Certains principes peuvent être dégagés :

- Mettre en visibilité la nature des intervalles de confiance publiés dans le rapport

Revenons à la contribution du GT1 au 5^e RE (2013). Le profil RCP2.6 (le plus ambitieux de ce rapport) projetait une élévation de température moyenne de l'atmosphère proche de la surface terrestre située à la fin du XXI^e siècle dans l'intervalle [0,8°C ; 2,4°C] par rapport à la période 1850-1900. À cet intervalle était associée une probabilité de 90 %, soit 5 % de chances que l'élévation dépasse 2,4°C et 5% de chances qu'elle soit sous 0,8°C⁴³⁴. Il y avait donc 5 % de chances, selon le GT1 du GIEC, que ce profil donne lieu à un dépassement des 2,4°C à la fin du XXI^e siècle. Les Résumés alternatifs nous semblent devoir comporter une présentation de ce risque et de sa probabilité associé, 5 %, tout en précisant deux choses. La première est que la construction de cette probabilité est basée sur l'appréciation et le jugement de scientifiques experts ; il s'agit d'une 'probabilité subjective'. La deuxième est que pour déterminer l'intervalle [0,8°C ; 2,4°C] et la probabilité associée (90%), les phénomènes du *Reste causal* n'ont pas été pris en considération ; si bien que la hauteur effective du risque présenté par le profil RCP2.6 est mis en invisibilité par cet intervalle de confiance. L'information sur la nature et sur le mode de construction des intervalles de confiance est indispensable à une synthèse des connaissances scientifiques qui soit authentique au plan scientifique et pertinente au plan politique.

- Mettre en visibilité le contenu du *Reste causal*

Il s'agit notamment d'informer sur les phénomènes potentiellement les plus conséquents du *Reste causal*, sans omettre la composante de l'Inconnu inconnu.

- Respecter un équilibre entre chiffres et narratif

⁴³⁴ Il est notable que sur la période 2015-2021, cette élévation de la température terrestre était déjà de l'ordre de 1,2°C, soit 0,4°C au-dessus de la borne inférieure de la projection du GIEC pour la fin du XXI^e siècle associée au profil RCP2.6. A ce sujet voir la section II.2.1.6 - 2014, un seuil climatique ?.

Il s'agit de rédiger des résumés accessibles au plus grand nombre, d'une part, et, d'autre part, libérés du scientisme qui consiste à quantifier le non quantifiable. Sur cette base, des chiffres dont l'enseignement est important sont à intégrer aux Résumés alternatifs, mais ils devraient être accompagnés de la présentation de leur *Reste causal*, hormis dans le cas où ce dernier serait négligeable ou à tout le moins peu impactant. De façon complémentaire, des développements narratifs seraient intégrés aux résumés, par exemple sur de possibles conséquences climatiques, environnementales et humaines concrètes suite à une expression donnée du *Reste Causal*.

IV.3.3 - Mode de rédaction et acteurs

IV.3.3.1 - Organismes ou institutions scientifiques indépendantes du politique et des lobbies

Les résumés des rapports du GIEC venant en complément des RID rédigés par le GIEC lui-même pourraient, par exemple, être élaborés par et sous la responsabilité de scientifiques dans un cadre institutionnel français, européen ou international disposant d'un haut niveau d'indépendance à l'égard des pouvoirs extérieurs (politiques, économiques, religieux...). Afin de limiter les risques d'intrusion de pouvoirs extérieurs, les scientifiques participant à la rédaction de ces résumés devraient être nommés par leurs pairs, selon des procédures transparentes, et leur participation devrait être prise en compte dans la répartition de leur temps de travail et leur déroulé de carrière, selon des procédures transparentes, communes (autant que faire se peut identiques pour tous) et stables. Par ailleurs, ces résumés alternatifs devraient être rédigés par des équipes de scientifiques pluridisciplinaires - afin d'assurer une synthèse des connaissances disciplinaires solide, fiable, avec le moins de biais possibles - et être élargies à des non scientifiques de profession - afin d'assurer un haut niveau de lisibilité du texte final et une prise en compte de points de vue profanes. En outre, des groupes test ou encore des groupes consultatifs de citoyens pourraient être mis en place. Enfin, des résumés alternatifs pourraient être rédigés par des conventions citoyennes.

IV.3.3.2 - Conventions citoyennes

Selon l'association française Sciences citoyennes « *La Convention Citoyenne est une procédure de participation qui combine une formation préalable (où les citoyens étudient), une intervention active (où les citoyens interrogent) et un positionnement collectif (où les citoyens rendent un avis).* »⁴³⁵. Ainsi, les conventions citoyennes, encore appelées conférences citoyennes ou conférences de consensus, s'organisent en trois temps :

- le temps « *des exposés et de la transmission de savoirs et d'informations* » ;
- le temps où « *ces simples citoyens interrogent des experts et dialoguent avec eux* » sur des thèmes choisis par le groupe des citoyens ;
- le temps de la rédaction d'un « *document qui constitue la réponse à la commande qui a été passée* ». (Callon M, 2001, p. 238 – 239).

La mise en place d'une convention citoyenne appelée à rédiger un Résumé, par exemple du rapport intégral du GT1 d'un RE du GIEC, nécessitera une adaptation des conférences citoyennes courantes, dont l'objectif est de donner un avis sur une question qui est l'objet d'une controverse. Cette adaptation comportera des innovations et une démarche de recherche action. Ces conférences citoyennes d'un nouveau genre pourront être nationales, européennes ou internationales. Elles auront à respecter un protocole et des règles, notamment dans le but d'assurer leur indépendance à l'égard des pouvoirs divers qui pourraient intervenir pour défendre des intérêts particuliers, qu'ils soient politiques, économiques, religieux ou autres. Ces protocoles et règles pourront s'inspirer des protocoles et règles, promus en France par l'association Sciences citoyennes⁴³⁶, qui bénéficient d'un support théorique basé sur des synthèses d'expérimentations menées dans différents pays (Fiorino DJ., 1990 ; Rowe G et al., 2000 ; Callon M. et al., 2001). Ces conférences pourraient décider de leur propre mode de synthèse de la masse des connaissances scientifiques présentées dans les rapports complets du GIEC. En particulier, elles pour-

435 <https://sciencescitoyennes.org/conventions-citoyennes/> Vu le 19 mai 2022.

436 <https://sciencescitoyennes.org/rubrique/democratisation-de-la-science/convention-de-citoyens/>

raient décider des éléments de connaissance à communiquer, d'une hiérarchisation de ces connaissances, du type de discours (plus ou moins narratif, plus ou moins quantifié, etc.).

Enfin, nous pouvons noter que ces conférences citoyennes constitueraient une approche science ouverte de la phase finale du processus de recherche, c'est à dire de la phase de communication vers la société. Aussi, elles pourraient contribuer à une approche science ouverte de la phase initiale du processus de recherche, dans le sens où ces conférences pourraient exprimer des attentes, des besoins et des demandes vis-à-vis de la recherche.

Chapitre 4 - Prolongements et perspectives de recherche

Notre thèse est le fruit d'un travail transdisciplinaire, permis par un parcours personnel déroulé sur plusieurs décennies où une formation en mathématiques et en sciences naturelles (physique, chimie, biologie) fut à la source de questionnements épistémologiques et politiques dans un contexte d'engagement dans la Cité. Un outil a été conçu, le *Reste Causal*. Une mise en perspective géologique a été posée, l'hypothèse de l'éon Anthropozoïque. Nous avons observé la disjonction entre des phénomènes fortement imprévisibles et les représentations de ceux-ci dans un contexte idéologique quantophrénique. Notre exploration de la production scientifique relative à quatre sources naturelles de méthane dont les développements durant le XXI^e siècle sont particulièrement imprévisibles et porteurs d'un risque d'emballement climatique a étayé le constat de cette disjonction exprimée dans le contexte de la dynamique science et politique au sein du GIEC.

Les prolongements de notre thèse pourraient donc être multiples et divers. Le plus souvent, ils nécessiteraient l'ouverture d'un programme de recherche et l'engagement d'une équipe pluridisciplinaire. Dans ce chapitre, nous en exposons un certain nombre. Un premier sous-chapitre est consacré aux prolongements auxquels nous souhaiterions plus particulièrement contribuer. Un second sous-chapitre expose ceux auxquels nous aurions souhaité participer, mais pour lesquels une impossibilité due à un temps non extensible se présente. Toutefois, la frontière entre ces deux sous-chapitres n'est pas infranchissable.

IV.4.1 – Mes perspectives de recherche

IV.4.1.1 – Le *Reste*. L'imprévisible. Repenser le triptyque science, expertise et politique.

Nous envisageons une poursuite de l'étude de la place accordée aux phénomènes causaux chargés d'imprévisibles relatifs au changement climatique dans la publication, la communication et la médiation scientifiques, dans l'expertise scientifique et les processus de décision politique ou encore dans les médias et par les réseaux associatifs et syndicaux. Il s'agirait en particulier de poursuivre l'exploration épistémologique du *Reste causal* et de ses modes de mise en invisibilité ou en visibilité, cela à partir du cas du changement climatique. L'étude du *Reste causal* associé aux scénarios climatiques du GIEC serait précisée au sujet du 6^e RE, puis prolongée pour les rapports à venir. Une méthodologie de l'étude du *Reste causal* associé aux RID de ces rapports serait développée et appliquée ; nous rappelons que notre étude de l'évolution de la mise en invisibilité de ce *Reste causal* allant du 1^{er} RE au 6^e RE a pu éclairer la dynamique science et politique au service de la mission politique du GIEC. Plus généralement, il s'agirait, à propos du changement climatique, d'analyser le contenu, ainsi que le niveau et le mode de mise en invisibilité du *Reste causal* associé à des résultats scientifiques, des expertises scientifiques, des expressions médiatiques, militantes ou politiques ou enfin à des décisions politiques ; au-delà, il s'agirait d'étudier les causes et les conséquences de ce contenu et de ses niveau et mode de mise en invisibilité.

Un autre programme de recherche pourrait explorer le *Reste causal* hors du domaine du changement climatique. Il s'agirait en particulier de poursuivre l'exploration épistémologique du *Reste causal* à tout objet ou phénomène dont l'évolution future dépend de phénomènes causaux dont certains sont largement imprévisibles. Une méthodologie de l'étude du *Reste causal* serait développée et appliquée. Plus généralement, il s'agirait d'analyser le contenu, ainsi que le niveau et le mode de mise en invisibilité, du *Reste causal* associé à des résultats scientifiques, des expertises scientifiques, des expressions médiatiques et enfin à des processus de décision politique, et d'en rechercher les causes et les conséquences.

Un programme de recherche pourrait repenser le triptyque science, expertise et politique. Il s'agirait, sur la base de bilans tels que celui de la dynamique science et politique qui préside aux travaux du GIEC, de pleinement intégrer l'imprévisible et la notion de *Reste*, en particulier celle de *Reste causal*. À côté de recherches académiques, ce programme comporterait une di-

mension recherche action, en collaboration avec des acteurs du triptyque science-expertise-politique : chercheurs et laboratoires de recherche, experts et institutions d'expertise, responsables politiques. Des conventions citoyennes pourraient être organisées, telles que celles que nous avons présentées dans notre précédent chapitre.

Il pourrait être fructueux de concevoir les politiques dans une acception large, incluant les directions d'entreprises de production et plus largement tous les lieux qui exercent un pouvoir de décision. Aussi, nous pourrions contribuer à des travaux visant à intégrer le *Reste* en général et le *Reste causal* en particulier dans l'étude et le développement de composantes du triptyque science-expertise-politique telles que la prospective, notamment la prospective stratégique, ou la conception, notamment l'éco-conception. Enfin, la notion de *Reste* serait étudiée et utilisée dans une approche dynamique qui prendrait pleinement en considération les variations des *Restes* en fonction du temps. Nous avons vu que le 6^e RE a donné lieu à une prise en compte partielle inédite du dégel du pergélisol comme phénomène causal des scénarios climatiques ; en d'autres termes, cette partie du dégel du pergélisol a été sortie du *Reste causal*. Cette approche dynamique du *Reste* est particulièrement nécessaire à toute étude de l'évolution du PIB, notamment en période de mutation technologique ou/et sociétale ; par exemple, actuellement des nouveaux services numériques à forte valeur d'usage n'ont pas de valeur marchande et ne reposent pas sur l'activité d'une administration publique, ils n'entrent donc pas dans le calcul du PIB, mais se situent dans le *Reste* associé à celui-ci ; (Aït-El-Hadj, 2018, p.147-148).

Enfin, un programme de recherche pourrait avoir pour finalité la diffusion de la notion de *Reste causal*, voire plus largement de la notion de *Reste*, dans les cultures et les pratiques, les représentations, les stratégies et les processus de décision des humains et de leurs sociétés. Pour contribuer à cette diffusion, des recherches actions pourraient être développées, en particulier autour de productions d'œuvres picturales, littéraires, cinématographiques, théâtrales, autour de productions de bandes dessinées, de facilitations graphiques, ou encore autour d'ateliers d'écriture ; par exemple avec pour objet la création de narratifs des risques liés à un *Reste causal*.

Chacun de ces quatre programmes appelle bien plus que l'engagement d'un seul chercheur. Mon intention est de poursuivre des travaux de recherche qui contribueraient à leur développement en collaboration avec d'autres chercheurs ou équipes de recherche.

IV.4.1.2 - L'éon Anthropozoïque : Une nouvelle narration de l'histoire humaine

Nous envisageons de prolonger notre annexe 1 d'un programme de recherche-action pluridisciplinaire. Tout d'abord, il s'agirait d'enrichir et de diffuser les notions de système bio-Terre et d'éon Anthropozoïque. Corrélativement, il s'agirait de penser la singularité de l'espèce vivante Homo-sapiens par rapport aux autres mammifères, de revisiter sa place et son devenir au sein du vivant et plus largement au sein du système bio-Terre.

Une déclinaison concrète pourrait porter sur les scénarios du GIEC. Pour l'essentiel, seuls des travaux du Groupe 1 du GIEC ont été étudiés dans notre thèse, plus précisément des travaux qui portent sur les conséquences climatiques des émissions de GES et plus largement sur les conséquences climatiques des activités humaines. Un prolongement de notre thèse pourrait être une étude analytique et critique des scénarios du GIEC en amont des émissions de GES, et non plus en aval ; c'est à dire une étude des aspects techno-socio-économiques. Cette étude porterait plus particulièrement sur les travaux du Groupe 3, et serait à mener au regard de l'hyper-complexité de l'humanité et de sa métamorphose en cours. Une problématique pourrait être : *Comment les politiques d'atténuation climatique présentées dans les travaux du Groupe 3 prennent en considération la capacité de métamorphose de l'humanité et d'évolution de sa relation avec le système bio-Terre ? Comment prennent-elles en considération l'aspect imprévisible d'une telle métamorphose et d'une telle évolution ?*

Un programme de recherche, réalisé par des équipes pluridisciplinaires et présentant une dimension participative, pourrait alors avoir pour objet la conception d'autres scénarios techno-socio-économiques que ceux présentés par le GIEC. Ce programme élargirait le champ des possibles en se situant dans la perspective de l'éon Anthropozoïque, et en se fondant sur une plus grande prise en compte de l'imprévisibilité de l'Humanité liée à sa capacité d'innovation technique, sociale, institutionnelle et culturelle, et plus largement à sa capacité d'auto-transformation.

IV.4.2. - Perspectives au-delà de mes propres recherches

IV.4.2.1 – Questionnements psycho-socio-politiques relatifs aux rapports du GIEC

Cette section présente une liste de faits problématiques relatifs aux rapports du GIEC, pour lesquels pourraient être menées des recherches sur les processus dont ils sont issus, composés d'interactions psycho-sociales, de rapports de force ou de demandes politiques et de motivations individuelles et collectives. Pour chacun de ces faits, une série de questions pourrait être explorée. Pour exemple, s'il s'agit d'un passage d'un rapport : qui est l'auteur-e initial-e ? Un rapport de forces s'est-il exercé entre les rédacteurs principaux du chapitre ou du résumé concerné ? Des pressions politiques ont-elles eu lieu lors de la relecture par les gouvernements ? Y a-t-il eu une négligence ? Quelle motivation éventuelle a conduit à cette situation ? Quelle chaîne d'influences ? Quels comportements ou implications des différents acteurs ?

Dans le corpus de ces recherches, il y aurait notamment des résultats d'entretiens et les comptes-rendus des réunions du GIEC publiés sur le site de la structure.

Voici notre liste de faits problématiques.

IV.4.2.1.1 - Contradictions entre les savoirs

Sur des points politiquement sensibles, nous avons relevé des contradictions internes aux RE du GIEC - par exemple entre un rapport intégral et son RID – et des contradictions entre des passages de ces rapports et les articles scientifiques auxquels ils se réfèrent.

Exemple 1. Confer le sous-chapitre III.3.1 – *L'effacement ponctuel puis rebond*. Durant plus de vingt ans, le *Reste causal* associé aux scénarios pour le XXI^e siècle a été effacé des RID des contributions du GT1 aux RE successifs, bien qu'il n'en fût pas de même des contributions intégrales. De façon similaire, de ces RID tout propos sur l'édulcoration par les scénarios ou sur les risques de surprise avait disparu. Puis, en 2021, le 6^e RE a vu dans le RID du GT1 un retour

du *Reste causal*, ainsi que des propos présentant l'édulcoration par les scénarios et le risque de surprises.

Exemple 2. Confer notre sous-section III.2.4.3.2 – *Un rapport intégral qui édulcore le risque* ; sous-section où il est question du pergélisol. Nous y voyons qu'une édulcoration des risques liés au changement climatique se trouve dans la contribution intégrale du GT1 au 5^e RE, et non pas seulement dans les Résumés.

Exemple 3. Confer notre sous-chapitre III.1.2. Nous y voyons que deux passages de la contribution du GT3 au 4^e RE traduisent de façon clairement erronée des données et viennent en appui au *facteur 2*.

Exemple 4. Confer notre sous-chapitre III.3.2 - *2^e RE, 1995*. Nous y voyons qu'une contradiction nette et majeure est présente au sein du RID de la contribution du GT1.

IV.4.2.1.2 - Traductions hâtives de savoirs scientifiques en savoirs d'expertise

Il s'agit ici de mener des études épistémologiques et psycho-socio-politiques.

Exemple 1. Voir la sous-section III.2.7.2.2 - *Des estimations extrêmement diverses et beaucoup d'inconnus*. Dans cette sous-section, nous observons un savoir scientifique fondé sur des hypothèses qui ne sont vérifiées ni par l'observation ni par l'expérience ; qui plus est, des hypothèses dont la validité est très incertaine. Ce savoir a bien une valeur scientifique. En revanche, il a peu de chance d'approximer l'aspect étudié du réel, hormis par le plus grand des hasards, et ne peut donc être traduit en un savoir d'expertise.

Exemple 2. Voir le dernier paragraphe de la section III.2.6.3 - *Un apport scientifique majeur après la période de rédaction du 5^e RE*. Ici, une amélioration de la modélisation des océans (une résolution spatiale plus fine) débouche sur un résultat pris en compte dans le 6^e RE, opposé au résultat antérieur pris en compte dans le 5^e RE ; cela sur une question potentiellement majeure pour l'évolution du changement climatique dès le XXI^e siècle.

IV.4.2.1.3 - L'absence du vivant marin méthanogène dans le 5^e RE du GIEC

Confer la section III.2.8.5 – *Le silence du 5^e RE*. Nous y voyons que le vivant marin méthanogène n'est pas cité une seule fois dans ce rapport, bien qu'il constitue un phénomène causal potentiellement majeur de l'évolution du climat durant le XXI^e siècle.

IV.4.2.2 – Autres

IV.4.2.2.1 – À propos d'auteurs des rapports du GIEC

Une recherche pourrait porter sur les interactions entre le contenu d'article et de discours de Valérie Masson-Delmotte, d'un côté, et, de l'autre, son intégration, son ascension et son influence dans le GIEC. Voir par exemple son article de 2013 où elle omit de citer certains phénomènes du *Reste causal* associé aux scénarios publiés dans le 5^e RE ; confer la sous-section II.2.2.1.7 – *Déglaciations passées, une approche des lois qui président au réchauffement actuel* ?. Plus précisément, elle omit de ce *Reste causal* exactement la partie non signalée dans le RID du GT1. S'agissait-il d'une assimilation, par imprégnation inconsciente, de la position du GIEC ? S'agissait-il de l'expression d'une volonté de contribuer à asseoir, et surtout de ne pas fragiliser, la crédibilité d'un GIEC subissant les attaques des climato-sceptiques ? Autres causes ?

Une autre recherche pourrait porter sur le rôle joué par V. Masson-Delmotte dans la réduction importante du niveau d'édulcoration du RID du GT1 à l'occasion du 6^e RE, et plus généralement sur sa contribution dans le GIEC, mais aussi auprès des politiques et dans la société.

Une recherche similaire pourrait être menée au sujet de François-Marie Bréon ou de Jean Jouzel, avec éventuellement des éléments de méthodologie comparative appliqués à l'ensemble de ces trois climatologues.

IV.4.2.2.2 – Depuis 2013, quelle expression des divergences entre climatologues ?

Des divergences entre climatologues étaient tues afin de ne pas fragiliser le processus qui mena, à l'occasion de la publication du 5^e RE en 2013, au consensus international reconnaissant le réchauffement climatique et son origine anthropique ; Confer notre section IV.2.2.5 - *Des divergences discrètes au sein de la communauté des climatologues*. La perte d'influence des climato-sceptiques et le consensus de 2013 ont-ils libéré l'expression des divergences et des controverses entre climatologues ? Si oui de quelle façon ? Avec quelles limites ? Selon quelle temporalité ? Avec quelle portée ?

IV.4.2.2.3 – Quelles discontinuités entre savoirs dans les futurs rapports du GIEC ?

Un programme de recherche pourrait consister à détecter dans les futurs rapports du GIEC des discontinuités ou ruptures entre les Rapports complets et les Rapports à l'intention des décideurs ou encore entre les résultats de la recherche scientifique et les Rapports complets. Ces discontinuités ou ruptures pourraient alors être analysées dans le contexte des missions du GIEC et des rapports science et politique qui s'exercent dans cette institution.

CONCLUSION

La problématique de notre thèse - *Quelle prise en compte du non connu et de l'imprévisible dans l'élaboration des politiques climatiques ? Quel rôle du GIEC à cet égard et plus largement dans le triptyque science, expertise et politique relatif au changement climatique ?* - s'est avérée féconde, dans plusieurs directions.

La première concerne la dynamique science et politique. Les places et les rôles respectifs des scientifiques et des représentants des gouvernements nationaux, les modes de rédaction et de validation des rapports, font du GIEC une organisation hybride, tout à la fois scientifique et politique. Une mission centrale de celle-ci, voire la mission fondatrice, est de développer une dynamique science et politique vers un consensus susceptible de fonder, ou tout au moins de motiver, une mobilisation internationale des « décideurs » politiques, économiques.... Il s'agit de contribuer à ce que l'ensemble des nations et des populations qui composent l'humanité s'engage dans une mobilisation partagée visant à atténuer et contenir le changement climatique, tout en s'adaptant à celui-ci. Cette mission repose sur le constat que traiter le problème du changement climatique nécessite un engagement conjoint de l'ensemble des nations du monde. Elle s'appuie sur le processus, auquel réciproquement elle contribue, d'acquisition par les humains de la conscience d'appartenir à une humanité confrontée à des défis communs - ici le changement climatique.

La montée en puissance de la mobilisation politique actuelle face au changement climatique a été précédée d'un long développement de la question scientifique du réchauffement climatique.

Nous pouvons considérer que le point initial de ce développement est la découverte, en 1856, par la chercheuse étasunienne Eunice Foote, selon laquelle le dioxyde de carbone occasionne un effet de serre. Dès lors, la prudence aurait pu inviter à limiter les rejets de ce gaz dans l'atmosphère, dans l'attente d'une connaissance suffisante pour en mesurer les conséquences sur le climat. Mais les politiques et les émissions de CO₂ se sont amplifiées sans frein. Il a fallu attendre l'Assemblée générale de l'ONU de l'année 1974 pour voir une première apparition du changement climatique sur l'agenda politique international. Toutefois, il ne s'agissait pas alors de réduire les émissions de GES, ni même d'en réduire la croissance, mais de créer les conditions d'une accélération de la production de connaissances relatives au changement climatique et de les mettre à disposition des décideurs politiques ; un débouché en a été, quatorze ans plus tard, la création du GIEC.

À la fin des années 1970, les connaissances scientifiques relatives au climat montraient une élévation significative des concentrations de GES, une reprise de la hausse de la température terrestre après près de trois décennies de stabilisation, et un risque de rétroactions positives. La modélisation climatique permettait une première évaluation des conséquences à venir. De premiers rapports officiels étaient rédigés à la demande du politique. Un risque élevé de déstabilisation du climat, porteur de conséquences majeures et néfastes pour l'humanité, était avéré. Des éléments scientifiques robustes pouvaient sembler suffisants pour enclencher une mobilisation politique au nécessaire niveau international. Puis, durant les deux dernières décennies du XX^e siècle, les travaux des climatologues n'ont cessé de renforcer l'hypothèse d'un réchauffement d'origine anthropique aux conséquences graves et irréversibles. Cependant, ce n'est qu'en 1992, que, avec la création de la CCNUCC, a été trouvé un premier accord politique international visant à contenir les émissions de GES. Cinq ans plus tard, en 1997, une première traduction concrète en a été le protocole de Kyoto, dont les ambitions étaient limitées, mais qui, dans le même temps, s'est traduit en un premier frein politique à l'accroissement des émissions.

Une dynamique internationale science et politique a ainsi été initiée en 1974, par l'Assemblée générale de l'ONU. Celle-ci a trouvé un essor au sein du GIEC, créé en 1988 ; lequel GIEC est devenu une pièce maîtresse de la mobilisation politique internationale face au changement climatique.

Dès le début des années 1990, le GIEC avait acquis une notoriété internationale. En juin 1992, G.O.P. Obasi, Secrétaire général de l'OMM, et M.K. Tolba, Directeur exécutif du PNUE, écrivaient, dans la préface d'un document du GIEC, « en août 1990, le GIEC remettait son premier Rapport d'évaluation qui (...). Ce rapport est aujourd'hui un ouvrage de référence fort prisé des décideurs, des scientifiques et des spécialistes. »⁴³⁷

Au début des années 2000, la réalité d'un réchauffement climatique d'origine anthropique avait été confirmée par les modèles. Cela s'est traduit en 2013 par un consensus au sein de l'Assemblée plénière du GIEC, et donc entre les nations du monde, lesquelles reconnaissaient en des termes ne comportant aucune ambiguïté l'existence de ce réchauffement et son origine anthropique. Dans la foulée, la mobilisation politique internationale a connu une accélération majeure. Tout d'abord, en 2015, avec la COP21 et l'Accord de Paris. Puis, répondant à une demande intégrée dans cet Accord politique, le GIEC publia en 2018 le *Rapport spécial sur les conséquences d'un réchauffement planétaire de 1,5°C par rapport aux niveaux préindustriels* (parfois appelé *Rapport 1,5°C*). Des scénarios de ce rapport visent 1,5°C en 2100. Ils passent tous par la neutralité carbone (émissions nettes de CO₂ nulles) vers 2050 et présentent une réduction rapide des émissions avant 2030. En retour, des nations de plus en plus nombreuses se sont appropriées ces objectifs, notamment celui de neutralité carbone. Enfin, depuis le milieu des années 2010, des programmes nationaux de plus en plus ambitieux voient le jour.

Les causes de cette mobilisation politique croissante sont multiples. A côté du rayonnement international des rapports du GIEC, nous avons notamment la multiplication, l'intensification et la médiatisation des événements climatiques extrêmes ou atypiques, la mobilisation citoyenne dont les grèves de lycéens, et quelques succès électoraux de l'écologie politique. Ces causes ont pu se renforcer mutuellement, ainsi les mobilisations citoyennes s'appuient notablement sur le GIEC et ses rapports.

Des scénarios du Rapport spécial 1,5°C sont utilisés comme base scientifique d'une stratégie politique quantifiée au niveau international autour de l'objectif de neutralité carbone en 2050, nous venons de la voir, et plus largement autour d'objectifs de trajectoires chiffrées d'émissions nettes de GES entre aujourd'hui et 2050.

⁴³⁷ https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/05/ipcc_90_92_assessments_far_full_report_fr.pdf . Page VII.

Cependant, cette stratégie, inscrite dans un contexte quantophrénique, ne prend pas en considération le *Reste causal* (l'ensemble des phénomènes causaux non pris en considération) associé à ces scénarios climatiques pour le XXI^e siècle. Or, la fiabilité de ces scénarios climatiques, en tant que prédictions conditionnées à des scénarios techno-socio-économiques, repose sur l'hypothèse selon laquelle ce *Reste* serait négligeable alors que, dans les faits, il pourrait prendre une ampleur non négligeable et impacter de façon conséquente l'évolution du climat durant le XXI^e siècle. Nous avons finalement une stratégie politique internationale qui repose sur une représentation quantifiée du changement climatique pour le XXI^e siècle ne prenant pas en considération des phénomènes causaux, en particulier ceux marqués du sceau de l'imprévisibilité - parmi lesquels se trouvent, entre autres, le dégel du pergélisol (en partie ou en totalité⁴³⁸), la fonte d'hydrates des fonds marins, la fonte de glaciers polaires et le développement de populations de micro-organismes marins méthanogènes. Finalement, les objectifs politiques chiffrés qui prévalent depuis 2018 s'appuient sur une représentation édulcorée et imprudente qui rend invisibles des risques majeurs du changement climatique. Ainsi, bien que les conditions de l'appel au Principe de précaution soient remplies, ce principe n'est pas convoqué, y compris par les nations, telles que la France, qui l'ont adopté. Finalement, le pari de ou la croyance décrite par Max Weber en la « maîtrise par la prévision et par la technique » guide l'action politique.

Une deuxième direction féconde de notre problématique et de nos travaux de recherche est la conceptualisation du *Reste causal*. Nous avons introduit cette notion pour les besoins de notre thèse et la clarté de son exposé, en particulier pour étudier les scénarios climatiques du GIEC et leur présentation dans les rapports de ce dernier, plus particulièrement dans les Résumés à l'intention des décideurs des contributions du 1^{er} Groupe de travail.

Nous avons montré que, pendant environ deux décennies, ces résumés avaient opéré un repli et donné une présentation experte édulcorée du changement climatique pour le XXI^e siècle. Cette présentation reposait notamment sur une mise en invisibilité du *Reste causal* associé aux scénarios

438 Nous avons vu, chapitre III.2 que le dégel du pergélisol en tant que phénomène causal était totalement mis à l'écart par les scénarios du 5^e RE. Par contre dans le 6^e RE il était pris en compte, mais partiellement ; voir notre chapitre III.3.

rios climatiques et, corrélativement, une mise en invisibilité de l'inconnu et de l'imprévisible ; ce qui, au demeurant, avait pu favoriser la construction progressive du consensus international acquis en 2013 reconnaissant le changement climatique et son origine anthropique.

Nous avons aussi montré que les objectifs chiffrés sur lesquels repose la stratégie politique qui - comme rappelé ci-dessus - se déploie actuellement dans le monde face au changement climatique, sont fondés sur une omission imprudente du *Reste causal* associé aux scénarios.

A contrario, nous avons montré que ce *Reste causal* peut constituer un instrument d'aide à la définition d'une stratégie politique relative au changement climatique intégrant l'imprévisible. En particulier, il peut aider à la décision d'une application ou non du Principe de précaution par les pays et les organisations qui ont adopté ce principe.

Au-delà de la question du changement climatique, le *Reste causal* est le support d'un enrichissement méthodologique potentiel tant au sein de disciplines scientifiques proprement dites, que dans le domaine de la multi/pluridisciplinarité, de l'inter/transdisciplinarité, de la science post-normale, de l'information scientifique, ou encore dans les domaines de l'expertise et de la stratégie politique. C'est en particulier un outil d'analyse, de renouvellement et d'évaluation du triptyque science, expertise et politique, et notamment un outil de mise en lumière de la quantophrénie, un outil agissant à la manière d'un antidote de cette dernière.

Le *Reste causal* peut contribuer au développement d'une approche scientifique qui couvre l'ensemble des phénomènes causaux de l'évolution ou de l'émergence à venir d'un phénomène donné, et d'une épistémologie qui ne rejette pas le réductionnisme, la quantification, la modélisation mathématique et les projections sous la forme de scénarios, mais les dépasse en mettant en visibilité les phénomènes causaux qui n'ont pas été pris en considération par ces approches. Les conséquences et apports potentiels de cette épistémologie pourraient être multiples, scientifiques, politiques et culturels. Sa diffusion et sa pleine appropriation par les scientifiques, et par les institutions qui décident des orientations et des thématiques ou objets prioritaires de la recherche, ne se traduiraient-elles pas par un accroissement des travaux consacrés aux phénomènes situés dans des *Restes causaux* ? Lesquels peuvent s'avérer être de véritables puits d'objets de recherche. Plus largement, une évolution de la relation entre la science et ses objets

d'étude pourrait alors se dessiner, dès lors que des *Restes causaux* conséquents se présentent. Cette relation deviendrait tout à la fois plus complexe et plus authentique, plus fidèle, et intégrerait l'imprévisible. Une présentation systématique du *Reste causal*, associé aux conclusions d'une étude scientifique ou d'une expertise scientifique portant sur l'évolution à venir d'un phénomène donné, pourrait constituer un garde-fou contre le scientisme qui consiste à vouloir ou à prétendre parvenir à quantifier le non quantifiable et contre les représentations erronées dues à la mise en invisibilité de *Restes causaux* non négligeables. Finalement, la vocation du *Reste causal* ne serait-elle pas d'acquérir le statut de concept structurant de la production, de la communication et de l'expertise scientifiques ?

Plus largement, la notion de *Reste* (ce qui est omis par une théorie, un calcul, une représentation, un résultat d'expertise, une approche politique...) que notre thèse a brièvement abordée dans les domaines de l'économie, de la géo-ingénierie, de la collapsologie ou encore associée à l'empreinte écologique, pourrait s'avérer féconde dans de nombreux pans de la recherche en situation complexe, ainsi que dans la communication scientifique et l'expertise ou encore dans la décision politique.

Une troisième direction concerne la modélisation climatique et son *Reste causal* observés selon une perspective de temps long. Des développements de notre thèse ont montré que le système Terre a emprunté une bifurcation de sortie de la période géologique du Quaternaire, ce qui accentue le caractère imprévisible du changement climatique dès le XXI^e siècle et réduit la portée, voire la fiabilité, des résultats de la modélisation climatique portant sur le futur – du moins en tant que savoir d'expertise, c'est-à-dire en tant que savoir utile à la décision, que celle-ci soit politique ou économique, collective ou individuelle.

Les scénarios du GIEC reposent sur la modélisation climatique dont la validité est vérifiée sur un intervalle de temps réduit qui débute dans la période géologique du Quaternaire et mène jusqu'à nos jours. Or le système-Terre est un système hyper-complexe qui bifurque hors de cette période du Quaternaire et les temps qui viennent seront inédits et chargés d'imprévisibles. Par

conséquent, le *Reste causal* associé aux modèles climatiques et corrélativement aux scénarios climatiques possède une composante Inconnu inconnu particulièrement importante. Ainsi, de nombreux processus opérant lors des réchauffements du quaternaire sont profondément modifiés lors du réchauffement actuel et d'autres processus pourraient être spécifiques à ce dernier. Nous en avons exploré plusieurs raisons concrètes : la rapidité extrême de ce réchauffement ne s'est jamais produite durant le Quaternaire ; le niveau actuel des taux de GES n'a jamais été atteint ni même approché durant le Quaternaire et de là nous assistons à un affaiblissement des puits de ces GES voire à un risque de saturation de ceux-ci ; enfin d'autres déterminants du climat sont spécifiques au changement climatique en cours, il y a notamment le bouleversement anthropique du vivant et celui des sols.

Néanmoins, selon Stefan Aykut (2015, p.103), les modèles climatiques seraient un « *maillon essentiel de la chaîne sciences-expertise-politiques du climat, puisque seul outil produisant des projections quantitatives du climat futur* ». Nous dirions, plus exactement et plus modestement, que les modèles climatiques sont le seul outil procurant une probable représentation de la physionomie du climat futur pour une évolution de la température moyenne donnée, voire pour une évolution de la concentration des GES donnée. En revanche, ils ne permettent nullement des prédictions du devenir du climat, et ses projections pour une trajectoire donnée d'émissions anthropiques de GES masquent des risques majeurs. Néanmoins, la publication de ces projections, si elle est accompagnée de la publication de leur *Reste causal* et des risques présentés par ce dernier, met à la disposition des décideurs et plus largement des populations humaines, non pas une prédiction du futur, qui n'est pas à la portée de la science, mais un ensemble d'éléments qui apporte un certain éclairage scientifique et prospectif sur le futur climatique.

Une quatrième direction porte sur la stratégie à tenir face à l'imprévisible et au non quantifiable dans un contexte d'hyper-complexité. Atténuer, contenir, maîtriser dans la durée l'évolution d'un phénomène, tel que le changement climatique, inscrit dans un système hyper complexe, tel que le système bio-Terre, nécessite de mettre l'inconnu et l'imprévisible au cœur de l'expertise scientifique et du projet politique. Il s'agit de ne pas se limiter à des modélisations mathéma-

tiques quantifiées, mais de prendre en considération la complexité et l'imprévisibilité de l'ensemble des interactions, rétroactions, émergences, faits inédits, effet de plafond ou au contraire effet d'emballerment qui pourraient s'exprimer. Si bien que, toute stratégie qui intègre des objectifs chiffrés ou des scénarios quantifiés doit aussi indissociablement comporter une flexibilité et une capacité d'adaptation aux évolutions effectives du système complexe dans lequel se déroule l'action politique et humaine, et aux évolutions des savoirs relatifs à ce système et à cette action.

Par exemple, toute stratégie visant à atténuer et contenir le changement climatique devrait être conçue afin que l'action effective s'adapte sans cesse aux évolutions du système hyper complexe que constitue le système bio-Terre, d'autant que ce dernier subit aujourd'hui une bifurcation majeure qui, au demeurant, tend à s'emballer. L'action effective doit en outre s'adapter sans cesse aux évolutions du système hyper complexe que constitue l'humanité, d'autant que cette dernière connaît une métamorphose majeure (voir Annexe 1). Enfin, elle doit s'appuyer sans cesse sur les évolutions de la connaissance scientifique portant sur ces deux systèmes hyper complexes en interaction que sont le système-Terre et l'humanité.

Pour finir, se présente la nécessité de prendre en considération la diversité au sein de l'humanité : « *Une transition est un phénomène progressif qu'on peut considérer globalement mais dont on peut aussi observer chaque élément dans son contexte, selon ses circonstances. Cette analyse plus fine fait ressortir des différences parfois très importantes de vitesse et d'ampleur des changements d'un élément à l'autre. Or, chacun de ces parcours singuliers peut avoir une incidence forte sur l'ensemble de la transition ; inversement, le parcours global modèle chacun de ces parcours.* » (Paul Antoine et Delepouve, 2016, page 63). Cette prise en considération de la diversité a notamment motivé le passage d'une stratégie descendante, top-down, qui avait présidé au protocole de Kyoto, à une stratégie basée sur une dynamique de mobilisation internationale, qui a présidé à l'Accord de Paris et a été favorisée par la dynamique internationale science et politique du GIEC.

Une dernière direction concerne la nécessité de réduire fortement et rapidement les émissions anthropiques de méthane. En effet, une période de réduction rapide des émissions de gaz à effet de serre devrait s'ouvrir, avec notamment en objectifs la neutralité carbone et la fin ou la quasi-fin du recours aux énergies fossiles vers 2050. Or, le recours aux énergies fossiles est massivement émetteur d'aérosols, lesquels présentent un puissant effet refroidissant du climat terrestre. Il est donc indispensable de compenser la fin de cet effet refroidissant. Mais, nous allons voir qu'il sera ici nécessaire d'anticiper, d'agir avant, et non pas uniquement d'accompagner les politiques de réduction du recours aux énergies fossiles. Des décisions urgentes doivent être prises, afin d'éviter le déclenchement de rétroactions positives au réchauffement climatique et de là un emballement de ce dernier. Voyons cela de plus près.

Lors d'une telle période de réduction rapide du recours aux énergies fossiles, nous assisterons quasi-immédiatement à une baisse de la concentration des aérosols dans l'atmosphère et corrélativement à une baisse quasi-immédiate de l'effet refroidissant associé à leur présence. En effet, la durée de vie moyenne des aérosols atmosphériques est « *de l'ordre de 1 à 2 semaines dans la troposphère et de 1 à 2 ans dans la stratosphère* »⁴³⁹. Quant à la baisse de l'effet réchauffant des GES, elle ne sera pas immédiate, notamment en ce qui concerne les émissions de CO₂, cause essentielle de la part de réchauffement due au recours aux énergies fossiles. En effet, la durée médiane de vie d'une molécule de dioxyde de carbone dans l'atmosphère est actuellement d'environ 125 ans. Si bien que, durant cette période de réduction rapide des émissions de GES, nous pourrions assister à une accélération notable du réchauffement climatique, et donc à une augmentation du risque de rétroaction positive et de là, à une augmentation du risque d'emballement climatique.

D'où la nécessité de mettre en place des mesures qui anticipent la réduction rapide du recours aux énergies fossiles. Parmi ces mesures, il y a notamment une réduction urgente des émissions des sources anthropiques de GES autres que le CO₂. L'urgence de la réduction des émissions anthropiques de méthane est particulièrement cruciale : ces dernières sont aujourd'hui responsables d'environ 45 % du surplus d'effet de serre d'origine anthropique⁴⁴⁰, et le méthane présente une durée médiane de vie dans l'atmosphère d'environ une décennie. Une réduction im-

439 <https://www.climat-en-questions.fr/reponse/mecanismes-devolution/aerosols-climat-par-olivier-boucher> . Vu le 1^{er} juin 2022.

440 Confer notre section II.2.1.4 - Poids du méthane dans le surplus anthropique de gaz à effet de serre.

portante des émissions anthropiques de méthane aurait un puissant effet à l'échelle d'une décennie. Les domaines d'activités concernés sont connus : l'agriculture, laquelle représente environ 60 % de ces émissions (élevage de ruminants, culture inondée du riz, fumiers...) ; les fuites lors de l'exploitation des énergies fossiles représentent environ un tiers des émissions (ces émissions cesseront mécaniquement avec la fin de l'exploitation de ces énergies, dans l'attente il est urgent de développer des techniques de réduction de ces fuites) ; la combustion incomplète de biomasse ; les déchets...⁴⁴¹

Au sujet de cette urgence à réduire les émissions de méthane, dans son 5^e RE, en 2013 le GIEC alertait : « *Si l'on entreprend de réduire rapidement les concentrations d'aérosols sulfatés pour améliorer la qualité de l'air ou pour restreindre les émissions de CO₂ dues aux combustibles fossiles, on peut dire avec un degré de confiance moyen que cette réduction risque d'entraîner un réchauffement rapide à court terme. Il existe des indications selon lesquelles la maîtrise connexe des émissions de CH₄ compenserait une partie du réchauffement dû aux sulfates, même si le refroidissement imputable à la réduction du CH₄ mettra plus de temps à se manifester que le réchauffement dû à la réduction des sulfates, car la concentration de ces substances dans l'atmosphère diminue à des échelles de temps différentes à la suite d'une réduction des émissions.* »⁴⁴². Cependant, nous notons que le GIEC conçoit ici la réduction des émissions de méthane comme une mesure d'accompagnement, partiellement efficace, de la baisse des émissions d'aérosols. Nous suggérons, au contraire, de concevoir cette réduction comme une mesure qui, afin de corriger les différences de durée de vie, anticipe la baisse des émissions d'aérosols.

Pour finir, se présente la question des recherches portant sur les phénomènes de rétroaction au réchauffement climatique. Parmi ces phénomènes, certains présentent à la fois un haut niveau de risque et un haut niveau d'imprévisibilité. Cette imprévisibilité pourrait, le plus souvent, être réduite par un développement de la connaissance scientifique. Vu la hauteur des enjeux, il pourrait sembler opportun d'amplifier les programmes de recherche et les coopérations scientifiques

441 Confer notre section II.2.2.1 - Les sources anthropiques.

442 Extrait du RT de la contribution du GT1 au 5^e RE. Section 5.2, page 81.

internationales visant à approfondir la connaissance de ces rétroactions. Nous avons là une condition d'une amélioration de la stratégie d'atténuation du changement climatique et d'adaptation à celui-ci.

Ainsi, un programme de recherche pourrait étudier l'hypothèse selon laquelle les émissions de méthane issues de la fonte des glaciers des zones polaires contribueraient à la croissance rapide de l'augmentation du taux de ce GES dans l'atmosphère depuis 2014. En particulier, il s'agirait d'amplifier les recherches sur la fonte des glaciers polaires et sur les émissions de méthane qu'elle occasionne ou qu'elle occasionnera dans le futur. Cette recherche serait motivée par les articles de Nisbet et al. (2019, page 336) et Christiansen et al. (2021).

Épilogue

« *Les sciences du climat constituent l'exemple même de ce que Funtowicz et Ravetz (1993) appellent des sciences « post-normales », caractérisées par « des faits incertains, des valeurs discutées, des enjeux élevés et des décisions urgentes »* », ce propos d'Hélène Guillemot (2014, p.345) pourrait sembler correspondre à l'état actuel du consensus politique acquis au plan international. Cependant, la notion de « faits incertains » appelle quelques observations.

L'incertitude ne portait plus, en l'année 2014 où H. Guillemot tenait ce propos, sur l'effectivité d'un réchauffement climatique d'origine anthropique. Un consensus sur ce point était acquis depuis le RID de la contribution du GT1 au 5^e RE du GIEC, en 2013 ; consensus acquis mais encore fragile, comme le montra la présidence des États-Unis par Donald Trump. Par contre, des incertitudes majeures régnaient et règnent toujours sur les mécanismes et l'ampleur de l'évolution future du changement climatique, y compris dès le XXI^e siècle. Le nouvel élan pris aujourd'hui par la mobilisation politique internationale, après la publication du Rapport 1,5°C, notamment autour de l'objectif de neutralité carbone, gomme ces incertitudes en ne prenant en considération ni les intervalles de confiance associés aux scénarios du GIEC ni le *Reste causal* associé à ces scénarios. Dans la stratégie politique actuelle, les sciences du climat ne sont donc pas considérées comme des sciences post-normales.

Finalement, nous avons vu que les faits politiques entrent en nette contradiction avec les accusations d'inaction climatique ; mais, dans le même temps, la stratégie politique s'appuie sur des éléments d'expertise scientifique quantifiés et sur un déni de l'imprévisible, ce qui peut légitimement contribuer à une critique en nette insuffisance de l'engagement politique face au changement climatique.

Bibliographie

Agrawala S. (1998). *Context and early origins of the Intergovernmental panel of climate change*. Climatic Change 39, p. 605-620.

Arrhenius, S. (1896). *On the Influence of Carbonic Acid in the Air Upon the Temperature of the Ground*, Philosophical Magazine and Journal of Science 41 (5), 237–271. https://geosci.uchicago.edu/~archer/warming_papers/archer_galleys9781405196178_4_003a.pdf

Aykut Stefan C. (2015). *Comment se construit la confiance dans les sciences et les politiques du climat ? Retour sur un colloque international*, Natures Sciences Sociétés, 2015/Supp. 3, p. 102-110. <https://doi.org/10.1051/nss/2015022>

Aykut Stefan., Dahan Amy. (2014). *Gouverner le climat ? Vingt ans de négociations internationales*. Paris. Presses de Sciences Po.

Aït-El-Hadj Smaïl. (2018). *Le système technologique contemporain*. ISTE Éditions, Londres.

Ballantyne A., Alden C., Miller J. *et al.* (2012). *Increase in observed net carbon dioxide uptake by land and oceans during the past 50 years*. Nature 488, 70–72 (2012). <https://doi.org/10.1038/nature11299>

Barberousse A. (2015). *Le GIEC, une communauté d'expertise originale*. Cahiers philosophiques 2015/3 (n° 142), p. 121-131. <https://www.cairn.info/revue-cahiers-philosophiques1-2015-3-page-121.htm>

Barnola, J.M ; Raynaud, D ; Korotkevich, Y.S ; Lorius, C. (1987). *Vostok ice core provides 160,000-year record of atmospheric CO₂*. Nature, 1987, Vol.329 (6138), p.408-414

Bastianelli Nathalie (2021). *Quand la Chine s'éveille verte...* Édition de l'Aube, Paris.

Beaud M., Dostaler G. (1996). *La pensée économique depuis Keynes : historique et dictionnaire des principaux auteurs*, sous-chapitre « Pénélope : de l'idéal théorique à la complexité du monde, tisser l'impossible toile », collection Points, Éditions du Seuil, Paris.

Betts R., Jones C., Knight J. *et al.* (2016). *El Niño and a record CO₂ rise*. *Nature Clim Change* **6**, 806–810. <https://doi-org.ressources-electroniques.univ-lille.fr/10.1038/nclimate3063>

Bocquet Bertrand (sous la direction de). (2018). *La fièvre de l'évaluation. Quels symptômes ? Quels traitements ?* Presses universitaires du Septentrion. Villeneuve d'Ascq.

Boettcher Miranda ; Schäfer Stefan. (2017). *Reflecting upon 10 years of geoengineering research: Introduction to the Crutzen + 10 special issue*. *Earth's Future*, 2017-03, Vol.5 (3), p.266-277

Bonneuil C. et Fressoz J.B. (2013). *L'Événement Anthropocène*. Seuil. Paris. Mis à jour en 2016.

Bopp L., Resplandy L., Orr J. C., Doney S. C., Dunne J. P., Gehlen M., Halloran P., Heinze C., Ilyina T., Séférian R., Tjiputra J., and Vichi M. (2013). *Multiple stressors of ocean ecosystems in the 21st century: projections with CMIP5 models*, *Biogeosciences*, 10, 6225–6245, <https://doi.org/10.5194/bg-10-6225-2013>.

Boucher J. & Damien F. (2017). *Primary microplastics in the ocean. A Global Evaluation of Sources*. Rapport de l'Union Internationale pour la Conservation de la Nature (IUCN). 22 février 2017.

Bouleau Nicolas. (2014). *La modélisation critique*. Collection *Indisciplines*. Editions Quæ.

Boulton C.A., Lenton T.M. & Boers N. (2022). *Pronounced loss of Amazon rainforest resilience since the early 2000s*. *Nat. Clim. Chang.* (2022). <https://doi.org/10.1038/s41558-022-01287-8>

Bourguignon Didier. (2015). *Le principe de précaution: Définitions, applications et gouvernance*. 9 décembre 2015.

[https://www.europarl.europa.eu/thinktank/fr/document/EPRS_IDA\(2015\)573876](https://www.europarl.europa.eu/thinktank/fr/document/EPRS_IDA(2015)573876)

Box Jason E., Colgan William T., Christensen Torben Røjle, Schmidt Niels Martin, Lund Magnus, Parmentier Frans-Jan W., Brown Ross, Bhatt Uma S., Euskirchen Eugénie S., Romanovsky Vladimir E et al. (2019). *Key indicators of Arctic climate change: 1971–2017*. Environ. Res. Lett. **14** 045010. 8 April 2019.

<https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1748-9326/aafc1b#erlaafc1bs4>

Breitburg D., Levin L.A., Oschlies A., Grégoire M., Chavez F.P., Conley D.J., Garçon V., Gilbert D., Gutiérrez D., Isensee K., Ainto G.S., Limburg K.E., Montes I., Naqvi S.W.A., Pitcher G.C., Rabalais N.N., Roman M.R., Rose K.A., Seibel B.A., Telszewski M., Yasuhara M., Zhang J. (2018). *Declining oxygen in the global ocean and coastal waters*. Revue Science. Vol 359. 05 janvier 2018. <https://www.science.org/doi/10.1126/science.aam7240>

Bréon F.M. (2019). *Le climato-dénialisme n'est pas mort*. Science et pseudo-sciences n°328 – avril/juin 2019.

Bristow L.A., Callbeck C. M., M. Larsen, Altabet M. A., DeKaetmacker J., Forth M., Gauns M., Glud R. N., Kuypers M. M. M., Lavik G., Milucka J., Naqvi S. W. A., Pratihary A., Revsbech N. P., Thamdrup B., Treusch A. H. & Canfield D. E. (2017). *N₂ Production Rates Limited by Nitrite Availability in the Bay of Bengal Oxygen Minimum Zone*, *Nature Geoscience*, vol. 10, pp. 24-29, 5 décembre 2016.

Bryse Keynyn, Oreskes Naomi, O'Reilly Jessica, Oppenheimer Michael. (2013). *Climate change prediction: Erring on the side of least drama?*. Global Environmental Change, 23, pp. 327–337. <https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2012.10.008>

Cailloce L.. (2015). *Pergélisol, le piège climatique*. Interview de Florent Dominé par Laure Cailloce. Journal du CNRS. Janvier 2015.

Callon M., Lascoumes P., Barthe Y. (2001). *Agir dans un monde incertain, essai sur la démocratie technique*. Éditions du Seuil. Paris. Septembre 2001.

Carini, P., White, A., Campbell, E. *et al.* (2014). *Methane production by phosphate-starved SAR11 chemoheterotrophic marine bacteria*. *Nat Commun* **5**, 4346 (2014). <https://doi.org/10.1038/ncomms5346>

Charney Jule G., Arakawa A., Baker D. James, Bolin Bert, Dickinson Robert E., Goody Richard E., Leith Cecil E., Stommel Henry M., Wunsch Carl I. (1979). *Carbon Dioxide and Climate: A Scientific Assessment*. National Academy of Sciences. Washington, D.C. July 23-27, 1979. <https://nap.nationalacademies.org/read/12181/chapter/1>

Chen, Y., Roms, D.M., Seeley, J.T. *et al.* (2021). *Future increases in Arctic lightning and fire risk for permafrost carbon*. *Nat. Clim. Chang.* **11**, 404–410. Mai 2021. <https://doi.org/10.1038/s41558-021-01011-y>

Christiansen, J.R., Jørgensen, C.J. (2018). *First observation of direct methane emission to the atmosphere from the subglacial domain of the Greenland Ice Sheet*. *Nature. Sci Rep* **8**, 16623 (2018). <https://doi.org/10.1038/s41598-018-35054-7>

Christiansen Jesper R ; Röckmann Thomas ; Popa Maria E ; Sapart Celia J ; Jørgensen Christian J. (2021). *Carbon Emissions From the Edge of the Greenland Ice Sheet Reveal Subglacial Processes of Methane and Carbon Dioxide Turnover*. *Journal of geophysical research. Biogeosciences*, 2021-11, Vol.126 (11), p.n/a. ISSN: 2169-8953. EISSN: 2169-8961. DOI: 10.1029/2021JG006308.

Chuvilin, E.; Ekimova, V.; Bukhanov, B.; Grebenkin, S.; Shakhova, N.; Semiletov, I. (2019). *Role of Salt Migration in Destabilization of Intra Permafrost Hydrates in the Arctic Shelf: Experimental Modeling*. *Geosciences* 2019, **9**, 188. <https://doi.org/10.3390/geosciences9040188>

Crutzen Paul J. (2006). *Albedo Enhancement by Stratospheric Sulfur Injections: A Contribution to Resolve a Policy Dilemma?* Climatic change, 2006, Vol.77 (3-4), p.211-220.

Dahan A., Guillemot H. (2006). *Changement climatique : Dynamiques scientifiques, expertise, enjeux géopolitiques*. Sociologie du travail Vol. 48 - n° 3. 412-432. Juillet-Septembre 2006. DOI : <https://doi.org/10.4000/sdt.24798>

Dahan A., Guillemot H. (2015). *Les relations entre sciences et politiques dans le régime climatique : à la recherche d'un nouveau modèle d'expertise ?* Natures Sciences Sociétés (NSS), Paris. Vol 23, p. 6-18.

Dam, H.G., deMayo, J.A., Park, G. *et al.* (2021). *Rapid, but limited, zooplankton adaptation to simultaneous warming and acidification*. Nat. Clim. Chang. 11, 780–786. Septembre 2021. <https://doi.org/10.1038/s41558-021-01131-5>

Delepoue Marc. (2011). *Une société intoxiquée par les chiffres*. Éditions l'Harmattan. Paris. Décembre 2011.

Delepoue Marc et Bocquet Bertrand. (2020). *Sortir des énergies fossiles. Enjeux climatiques, énergies renouvelables et questions démocratiques*. Les Cahiers d'histoire du CNAM, Vol.13, p. 141-157. https://technique-societe.cnam.fr/medias/fichier/chc-13-2020-1_1617973363546-pdf

Demortain David. (2019). *Towards a sociology of quantification in governance*. Revue d'anthropologie des connaissances, Vol. 13, N°4, pages 973 à 990, doi : 10.3917/rac.045.0973

De Pryck Kari. (2014). *Le Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat, ou les défis d'un mariage arrangé entre science et politique*, CERISCOPE Environnement, 2014, [en ligne], consulté le 20/09/2022 : <http://ceriscope.sciences-po.fr/environnement/part1/content/le-groupe-d-experts-intergouvernemental-sur-l-evolution-du-climat>

De Pryck Kari. (2022). *GIEC. La voix du climat*. SciencesPo Les Presses.

Deshayes Julie et al⁴⁴³. (2013). *Oceanic hindcast simulations at high resolution suggest that the Atlantic MOC is bistable*. *Geophys. Res. Lett.*, 40, 3069- 3073 doi:[10.1002/grl.50534](https://doi.org/10.1002/grl.50534).

Devictor Vincent. (2021). *Gouverner la biodiversité ou comment réussir à échouer*. Éditions Quæ.

Dickens Gerald R., O'Neil J. R., Rea D. K. and Owen R. M. (1995). *Dissociation of oceanic methane hydrate as a cause of the carbon isotope excursion at the end of the Paleocene*. Décembre 1995. *Paleoceanography*, 10(6), 965-971. <https://doi.org/10.1029/95PA02087>.

Dickens Gerald R., Castillo Maria M., Walker James C. G. (1997). *A blast of gas in the latest Paleocene: Simulating first-order effects of massive dissociation of oceanic methane hydrate*. *Geology* (1997) 25 (3): 259–262. [https://doi-org.ressources-electroniques.univ-lille.fr/10.1130/0091-7613\(1997\)025<0259:ABOGIT>2.3.CO;2](https://doi-org.ressources-electroniques.univ-lille.fr/10.1130/0091-7613(1997)025<0259:ABOGIT>2.3.CO;2)

Duce R. et al. (2008). *Impacts of Atmospheric Anthropogenic Nitrogen on the Open Ocean*, *Science*, vol. 320, pp. 893-897, 2008.

Dufresne Jean-Louis. (2006). *Jean-Baptiste Joseph Fourier et la découverte de l'effet de serre*. *La Météorologie*, 2006, N° 53 ; p. 42-46 [10.4267/2042/20080](https://doi.org/10.4267/2042/20080)

Elliott S., Maltrud M., Reagan M ;, Moridis G., and Cameron-Smith P. (2011). *Marine methane cycle simulations for the period of early global warming*. *J. Geophys. Res. Biogeosci.*, 116, G01010, doi:10.1029/2010JG001300.

Espeland Wendy Nelson & Stevens Mitchell L. (2008). *A Sociology of Quantification*. *European Journal of Sociology*, 49(03), 401-436. doi : 10.1017/S0003975609000150.

Etheridge, D. M., Steele, L., Francey, R. J., & Langenfelds, R. L. (1998). *Atmospheric methane between 1000 AD and present: Evidence of anthropogenic emissions and climatic variability*. *Journal of Geophysical Research*, 103, 15,979–15,993. <https://doi.org/10.1029/98JD00923>

443 Anne-Marie Tréguier, Bernard Barnier, Albanne Lecointre, Julien Le Sommer, Jean-Marc Molines, Thierry Penduff, Romain Bourdallé-Badie, Yann Drillet, Gilles Garric, Rachid Benshila, Gurvan Madec, Arne Bias-toch, Claus Böning, Markus Scheinert, Andrew Coward, Joël Hirschi.

Farquharson L. M., Romanovsky V. E., Cable W. L., Walker D. A., Kokelj S. V., Nicolsky D. (2019). *Climate Change Drives Widespread and Rapid Thermokarst Development in Very Cold Permafrost in the Canadian High Arctic*. Geophysical Research Letters. 10 juin 2019.

Feely R., Wanninkhof R., Takahashi T. et al. (1999). Influence of El Niño on the equatorial Pacific contribution to atmospheric CO₂ accumulation. *Nature* 398, 597–601 (1999).
<https://doi.org/10.1038/19273>

Fiorino DJ. (1990). Citizen Participation and Environmental Risk: *A Survey of Institutional Mechanisms*. *Science, Technology, & Human Values*. 1990 ; 15(2) : 226-243.
[doi:10.1177/016224399001500204](https://doi.org/10.1177/016224399001500204)

Flannery-Sutherland, J. (2021). *Double jeopardy for fish diversity*. *Nat. Clim. Chang.* 11, 728–729. Septembre 2021. <https://doi.org/10.1038/s41558-021-01110-w>

Fourier J.-B. J., (1827). *Mémoire sur les températures du globe terrestre et des espaces planétaires*. Mémoires de l'Académie royale des sciences de l'Institut de France, VII, 570-604.

Fox, D. (2014). *Lakes under the ice: Antarctica's secret garden*. *Nature* 512, 244–246.
<https://doi.org/10.1038/512244a>

Funtowicz Silvio O. and Ravetz Jerome R. (1993). *Science for the post-normal age*. *Futures*, Volume 25, Issue 7, September 1993, Pages 739-755. [https://doi.org/10.1016/0016-3287\(93\)90022-L](https://doi.org/10.1016/0016-3287(93)90022-L)

Garilli, V., Rodolfo-Metalpa, R., Scuderi, D. et al. (2015). *Physiological advantages of dwarfing in surviving extinctions in high-CO₂ oceans*. *Nature Clim Change* 5, 678–682. Juillet 2015.
<https://doi.org/10.1038/nclimate2616>.

Genthon G., Barnola J.M., Raynaud D., Lorius C., Jouzel J., Barkov N.I., Korotkevich Y.S. & Kotlyakov V.M. (1987). *Vostok ice core: climatic response to CO₂ and orbital forcing changes over the last climatic cycle*. *Nature* volume 329, pp. 414-418.

Giovannoni Stephen J., Britschgi Theresa B., Moyer Craig L. et G. Field Katharine. (1990). *Genetic diversity in Sargasso Sea bacterioplankton*. Nature. 3 mai 1990.

Godet Michel et Durance Philippe (2011). *La prospective stratégique. Pour les entreprises et les territoires*. Éditions Dunod. Paris.

Guancheng Li, Lijing Cheng, Jiang Zhu, Kevin E. Trenberth, Michael E. Mann & John P. Abraham. (2020). *Increasing ocean stratification over the past half-century*. Nature Climate Change volume 10, 28 septembre 2020. pages 1116–1123.

Guespin-Michel J. (2011). *Les bactéries, leur monde et nous*. Édition Dunod, Paris.

Guespin-Michel J. (2015). *Pensée du complexe et émancipation*. Éditions du Croquant, Paris.

Guillemot Hélène. (2014). *Les désaccords sur le changement climatique en France : au-delà d'un climat bipolaire*. Natures Sciences Sociétés, 22, 340-350. <https://doi.org/10.1051/nss/2014047>

Guo X., Gao Y., Zhang S. et al. (2022). *Threat by marine heatwaves to adaptive large marine ecosystems in an eddy-resolving model*. Nat. Clim. Chang. 12, 179–186 (2022). <https://doi.org/10.1038/s41558-021-01266-5>

Hansen J., Sato M., Kharecha P., von Schuckmann K., Beerling D. J., Cao J., Marcott S., Masson-Delmotte V., Prather M. J., Rohling E. J., Shakun J., Smith P., Lacy A., Russell G. et Ruedy R. (2017). *Young people's burden: requirement of negative CO₂ emissions*. Earth Syst. Dynam., 8, 577–616, <https://doi.org/10.5194/esd-8-577-2017> , 2017.

Hansen James and Makiko Sato Makiko, (2021). *July Temperature Update: Faustian Payment Comes Due*. Université Columbia de New-York. 13 August 2021. <http://www.columbia.edu/~mhs119/Temperature/Emails/July2021.pdf>

Höhne, N., Gidden, M.J., den Elzen, M. et al. (2021). *Wave of net zero emission targets opens window to meeting the Paris Agreement*. Nat. Clim. Chang. 11, 820–822 (2021). <https://doi.org/10.1038/s41558-021-01142-2>

Hoos Ida R. (1979). *Societal aspects of technology assessment*. Technological Forecasting and Social Change, Volume 13, Issue 3, 1979, Pages 191-202. [https://doi.org/10.1016/0040-1625\(79\)90044-1](https://doi.org/10.1016/0040-1625(79)90044-1).

Hulme Mike, Mahony Martin. (2010). *Climate change: What do we know about the IPCC? Progress in Physical Geography: Earth and Environment*. 2010; 34(5): 705-718. doi:10.1177/0309133310373719

Isobe, A. ; Azuma, T. ; Cordova, M.R. *et al.* (2021). *A multilevel dataset of microplastic abundance in the world's upper ocean and the Laurentian Great Lakes*. Micropl.&Nanopl. 1, 16. 09 Septembre 2021. <https://doi.org/10.1186/s43591-021-00013-z>

Jackson Robert, Saunio M., Bousquet P., Canadell J.G., Poulter B., Stavert A.R., Bergamaschi B., Niwa Y., Segers A. and Tsuruta A. (2020). *Increasing anthropogenic methane emissions arise equally from agricultural and fossil fuel sources*. Published by IOP Publishing Ltd Environmental Research Letters, Volume 15, Number 7, 17 juillet 2020. <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1748-9326/ab9ed2>.

Jackson Roland. (2020). *Eunice Foote, John Tyndall and a question of priority*. The Royal Society journal of the history of science. Notes Rec.74105–118 <http://doi.org/10.1098/rsnr.2018.0066>

Janzwood Scott. (2020). Confident, likely, or both? The implementation of the uncertainty language framework in IPCC special reports. *Climatic Change* **162**, 1655–1675 (2020). <https://doi-org.ressources-electroniques.univ-lille.fr/10.1007/s10584-020-02746-x>

Jouzel J ; Lorius C ; Kotlyakov V. M ; Petit J. R ; Petrov V. M ; Genthon C ; Barkov N. I. (1987). *Vostok ice core: a continuous isotope temperature record over the last climatic cycle (160,000 years)*. Nature, 1987, volume 329, pp. 403–408.

Kaplan, Lewis D. (1952). *On the Pressure Dependence of Radiative Heat Transfer in the Atmosphere*. J. Meteorology 9: 1-12.

Koven Charles D., Ringeval Bruno, Friedlingstein Pierre, Ciais Philippe, Cadule Patricia, Khvorostyanov Dmitry, Krinner Gerhard, Tarnocai Charles. (2011). *Permafrost carbon-climate feedbacks accelerate global warming*. Proceedings of the National Academy of Sciences Sep 2011, 108 (36) 14769-14774. <https://doi.org/10.1073/pnas.1103910108>

Kuhry P., Dorrepaal E., Hugelius G., Schuur E. A. G., Tarnocai C. (2010). *Potential remobilization of belowground permafrost carbon under future global warming*. Permafrost and Periglacial Processes. Volume 21, Issue 2. 08 June 2010. P. 208-214. <https://doi.org/10.1002/ppp.684>

Kvenvolden Keith A. (1988). *Methane hydrate — A major reservoir of carbon in the shallow geosphere?* Chemical Geology Volume 71, Issues 1–3, 15 December 1988, Pages 41-51.

Lamarche-Gagnon G., Wadham J.L., Sherwood Lollar B. et al. *Greenland melt drives continuous export of methane from the ice-sheet bed*. Nature **565**, 73–77 (2019). <https://doi.org/10.1038/s41586-018-0800-0>

Lamarque Jean-François. (2008). *Estimating the potential for methane clathrate instability in the 1%-CO2 IPCC AR-4 simulations*. Geophysical Research Letters. Volume 35, Issue 19. <https://doi.org/10.1029/2008GL035291>

Lewandowsky Stephan, Oreskes Naomi, Risbey James S., Newell Ben R., Smithson Michael. (2015). *Seepage: Climate change denial and its effect on the scientific community*. Global Environmental Change, Volume 33, July 2015, Pages 1-13. <https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2015.02.013>

Lorius Claude et Carpentier Laurent. (2010). *Voyage dans l'Anthropocène*. Éditions Actes Sud.

Lovelock James. (1979). *La Terre est un être vivant, L'hypothèse Gaïa*. Éditions Flammarion. Paris. 1993. Édition initiale en 1979.

Magnan Alexandre. (2013). *Changement climatique : tous vulnérables ?* Éditions Rue d'Hulm. Paris.

Maréchal Jean-Paul. (2017). *La Chine face au mur de l'environnement*. CNRS Éditions.

Martin Olivier. (2002). *Mathématiques et sciences sociales au XXème siècle*. Revue d'histoire des sciences humaines, Publications de la Sorbonne, 2002, pp.3-13. hal-01261337.

Masson-Delmotte V. (2011). *Climat : le vrai et le faux*. Paris : Éditions Le Pommier.

McInerney Francesca A., Wing Scott L. (2011). *The Paleocene-Eocene Thermal Maximum: A Perturbation of Carbon Cycle, Climate, and Biosphere with Implications for the Future*. Annual Review of Earth and Planetary Sciences 1 mars 2011. <https://doi.org/10.1146/annurev-earth-040610-133431>

Micaela N. Pedrazas, M. Bayani Cardenas, Cansu Demir, Jeffery A. Watson, Craig T. Connolly and James W. McClelland. (2020). *Absence of ice-bonded permafrost beneath an Arctic lagoon revealed by electrical geophysics*. *Science Advances* 23 Oct 2020: Vol. 6, no. 43. DOI: 10.1126/sciadv.abb5083

Mondon Sylvain. (2017). *Défis environnementaux émergents*. APORS Edition / « Prospectives et stratégies » 2017/1 Numéro 8. ISSN 2260-0299. ISBN 9782954226309.

Nisbet, E. G ; Manning, M. R ; Dlugokencky, E. J ; Fisher, R. E ; Lowry, D ; Michel, S. E ; Myhre, C. Lund ; Platt, M ; Allen, G ; Bousquet, P ; Brownlow, R ; Cain, M ; France, J. L ; Hermansen, O ; Hossaini, R ; Jones, A. E ; Levin, Adeera ; Manning, A. C ; Myhre, G ; Pyle, J. A ; Vaughn, B. H ; Warwick, N. J ; White, J. W. C. (2019). *Very Strong Atmospheric Methane Growth in the 4 Years 2014-2017: Implications for the paris Agreement*. Washington: Amer geophysical union. *Global biogeochemical cycles*, 5 février 2019, Vol.33 (3), p.318-342. <https://doi.org/10.1029/2018GB006009>

ONERC (2013). Observatoire national sur les effets du réchauffement climatique. *Mieux comprendre le GIEC. Le GIEC comment ça marche. Le 5^e rapport d'évaluation*. Brochure. Paris. Ministère de l'Ecologie, du Développement durable et de l'Energie. Septembre 2013.

Oppenheimer Michael ; O'Neill Brian C. ; Webster Mort ; Agrawala Shardul. (2007). *The Limits of Consensus*. Science (AAAS), Vol. 317, Issue 5844, pp. 1505–1506, 2007. DOI: [10.1126/science.1144831](https://doi.org/10.1126/science.1144831)

O'Reilly J., Oreskes N. and Oppenheimer M. (2012). *The rapid disintegration of projections: The West Antarctic Ice Sheet and the Intergovernmental Panel on Climate Change*. *Social Studies of Science*, 42(5), pp. 709–731. <https://doi.org/10.1177/0306312712448130>

Paul Antoine Anne-Frédérique et Delepouve Marc. (2016). *Principes et processus*. Chapitre 3 de Transition énergétique et changement de société, coordination Delepouve M. Editions du Croquant. Paris. 2016.

Porter Theodore (1995). *Trust in Numbers : The Pursuit of Objectivity in Science and Public Life*. Princeton, Princeton University Press.

Radanne Pierre (2006). *Changement climatique et société(s)*. Revue Écologie & politique 2006/2 (N°33), pages 95 à 115.

Räisänen Jouni (2007). *How reliable are climate models?*. Tellus A: Dynamic Meteorology and Oceanography, 59:1, 2-29, DOI: [10.1111/j.1600-0870.2006.00211.x](https://doi.org/10.1111/j.1600-0870.2006.00211.x)

Ramstein G. (2015). *Voyage à travers les climats de la Terre*. Paris : Éditions Odile Jacob.

Ravishankara A. R., Danieland John S., Portmann Robert W. (2009). *Nitrous Oxide (N₂O): The Dominant Ozone-Depleting Substance Emitted in the 21st Century*. Science. 27 Aug 2009. Vol 326, Issue 5949, pp. 123-125. DOI: [10.1126/science.1176985](https://doi.org/10.1126/science.1176985)

Robock Alan. (2014). *Stratospheric Aerosol Geoengineering*. Chapter of the book *Geoengineering of the climate system* ; Editors: R M Harrison, R E Hester ; Cambridge, England ; Royal Society of Chemistry; <https://doi.org/10.1039/9781782621225-00162>

Rößger N., Sachs T., Wille C. et al. (2022). *Seasonal increase of methane emissions linked to warming in Siberian tundra*. Nat. Clim. Chang. 12, 1031–1036. <https://doi.org/10.1038/s41558-022-01512-4>

Rowe G, Frewer LJ. (2000). *Public Participation Methods: A Framework for Evaluation*. Science, Technology, & Human Values. 2000;25(1):3-29. doi:[10.1177/016224390002500101](https://doi.org/10.1177/016224390002500101)

Schmidtko S. et al., *Decline in Global Oceanic Oxygen Content during the Past Five Decades*, (2017). Nature vol. 542, pp. 335-339, 2017.

Schneider von Deimling, T., Meinshausen, M., Levermann, A., Huber, V., Frieler, K., Lawrence, D. M., and Brovkin, V. (2012). *Estimating the near-surface permafrost-carbon feedback on global warming*. Biogeosciences, 9, 649–665, <https://doi.org/10.5194/bg-9-649-2012> , 2012.

Shackley Simon, Risbey J., Stone P. et al. (1999). *Adjusting to Policy Expectations in Climate Change Modeling*. Climatic Change **43**, 413–454 (1999). <https://doi.org/10.1023/A:1005474102591>

Shakhova N., Semiletov I., Salyuk A., Yusupov V., Kosmach D. & Gustafsson Ô. (2010) . *Extensive Methane Venting to the Atmosphere from Sediments of the East Siberian Arctic Shelf*. Science. N° 327. Mars 2010.

Skidmore Mark L., Foght Julia M., Sharp Martin J. (2000). *Microbial Life beneath a High Arctic Glacier*. ASM Journals, Applied and Environmental Microbiology, Vol. 66, No. 8, 01 August 2000. DOI: <https://doi.org/10.1128/AEM.66.8.3214-3220.2000>.

Stramma L. et al. (2012). *Expansion of Oxygen Minimum Zones May Reduce Available Habitat for Tropical Pelagic Fishes*. Nature Climate Change, vol. 2, pp. 33-37, 2012.

Supiot Alain. (2015). *La gouvernance par les nombres. Cours au Collège de France (2012 - 2014)*. Editions Fayard. Paris. Juin 2015.

Tagliabue Alessandro, Bopp Laurent et Gehlen Marion. (2011). *The response of marine carbon and nutrient cycles to ocean acidification: Large uncertainties related to phytoplankton physiological assumptions*. Global Biogeochemical Cycles - GLOBAL BIOGEOCHEM CYCLE. 25. 10.1029/2010GB003929.

Thurber Andrew R., Seabrook Sarah and Welsh Rory M. (2020). *Riddles in the cold: Antarctic endemism and microbial succession impact methane cycling in the Southern Ocean*. Proc. R. Soc. B. 287: 20201134. 20201134. <http://doi.org/10.1098/rspb.2020.1134>

Touzé-Peiffer Ludovic. (2018). *Le climat : de l'observation à la modélisation. Brève histoire d'une épopée scientifique et technique*. Editions matériologique.

Våge Selina, Storesund Julia E. et Thingstad T. Frede. (2013). *SAR11 viruses and defensive host strain*. Nature 499. 25 juillet 2013.

Vieille Blanchard Élodie. (2011). *Les limites à la croissance dans un monde global. Modélisations, prospectives, réfutations*. Thèse pour l'obtention du titre de docteur. EHESS. 2011.

Wadham J.L., Tranter M., Tulaczyk S., Sharp M. (2008). *Subglacial methanogenesis: A potential climatic amplifier?* AGU, Vol.22 (2). 12 juin 2008. <https://doi.org/10.1029/2007GB002951>

Wadham J., Arndt S., Tulaczyk S. et al. (2012). *Potential methane reservoirs beneath Antarctica*. Nature 488, 633–637 (2012). <https://doi.org/10.1038/nature11374>

Wackernagel Mathis, Schulz Niels B., Deumling Diana, Callejas Linares Alejandro, Jenkins Martin, Kapos Valerie, Monfreda Chad, Loh Jonathan, Myers Norman, Norgaard Richard, Randers Jørgen. (2002). *Tracking the ecological overshoot of the human economy*. Proceedings of the National Academy of Sciences. Jul 2002, 99 (14) 9266-9271; DOI: 10.1073/pnas.142033699 www.pnas.org/cgi/doi/10.1073/pnas.142033699

Weber Max. (1919). *Le métier et la vocation de savant*. Publiée dans *Le savant et le politique*. Paris, Éditions 10-18. Traduction de Julien Freund. 1963.

Wigley Tom M. L. and Jones P. D. (1981). *Detecting CO₂-Induced Climatic Change*. Nature N°292, pp. 205-208.

Yamaguchi R., Rodgers K.B., Timmermann A. et al. (2022). *Trophic level decoupling drives future changes in phytoplankton bloom phenology*. Nat. Clim. Chang. 12, 469–476. <https://doi.org/10.1038/s41558-022-01353-1>

Zech R., Huang Y., Zech M., Tarozo R., and Zech W.. (2011). *High carbon sequestration in Siberian permafrost loess-paleosols during glacials*, *Clim. Past*, 7, 501–509, <https://doi.org/10.5194/cp-7-501-2011>

Zhao Y., Temperton B., Thrash J. C., Schwalbach M. S., Kevin L. Vergin, Zachary C. Landry, Mark Ellisman, Tom Deerinck, Matthew B. Sullivan et Stephen J. Giovannoni. (2013). *Abundant SAR11 viruses in the ocean*. *Nature*, 494, pages 357–360. 21 février 2013.

Zillman John W. (2009). *Historique des activités climatologiques*. *Bulletin de l'OMM*, Vol 58 (3), 2009. https://library.wmo.int/doc_num.php?explnum_id=6945

Zimov N. S., Zimov S. A., Zimova A. E., Zimova G. M., Chuprynin V. I., and Chapin F. S.. (2009). *Carbon storage in permafrost and soils of the mammoth tundra-steppe biome: Role in the global carbon budget*. *GEOPHYSICAL RESEARCH LETTERS*, VOL. 36, L02502, <https://doi.org/10.1029/2008GL036332>

Annexe 1 : Bifurcation vers l'éon Anthropozoïque

Émergences et imprévisibilité

Un remerciement particulier à Gilles Ramstein⁴⁴⁴. Son livre, *Voyage à travers les climats de la Terre* (2015), a nettement contribué à la maturation de la synthèse que j'expose dans *Bifurcation vers l'éon Anthropozoïque*. En outre, de nombreuses données des deux premières parties de mon texte sont tirées de son livre. Enfin, sa relecture du manuscrit, son soutien, ses corrections et suggestions ont été précieux.

⁴⁴⁴ Gilles Ramstein est paléoclimatologue, directeur de recherche au CEA.

Quel apport ?

Bifurcation vers l'éon Anthropozoïque présente une nouvelle approche du système Terre, de l'humanité et de la place de celle-ci au sein de ce système. Ce texte repose sur des découvertes scientifiques de ces trois dernières décennies, dont il produit une synthèse à l'aide des concepts des sciences du complexe.

La première partie du texte expose la mécanique et la complexité du système Terre. Elle introduit la notion de système bio-Terre, et rappelle que l'histoire du climat et plus largement celle du système Terre sont indissociables de l'histoire du vivant.

La deuxième partie resitue l'émergence de l'humain sur l'échelle des temps géologiques et introduit la notion d'éon Anthropozoïque. Au cours de l'histoire longue de notre planète, à plusieurs reprises, suite à l'apparition d'un nouveau type de vivant, le système bio-Terre et son climat ont été profondément et irréversiblement transformés, ouvrant un nouvel éon, la plus haute subdivision des temps géologiques. L'apparition de l'humain, il y a près de 3 millions d'années, constitue un événement de cette ampleur. Un nouvel éon s'est ainsi ouvert, l'Anthropozoïque. Un nouvel horizon collectif pour l'humanité est ainsi mis en évidence : nous ne saurions dès aujourd'hui en tirer toutes les conséquences philosophiques et anthropologiques.

La troisième et dernière partie aborde les défis que doit aujourd'hui relever l'humanité. Ces défis sont nombreux, inédits et porteurs d'une menace sur l'avenir même de l'espèce humaine, si bien que le propos n'est pas optimiste. Dans le même temps, il n'est ni pessimiste ni fataliste et se démarque des attitudes d'auto-flagellation et des messages de culpabilité d'une humanité qui serait à honnir. Une métamorphose de cette humanité, à l'œuvre depuis la première moitié du XXe siècle, s'accélère en ce début de XXIe siècle. De nouvelles possibilités se présentent. Le potentiel pour relever les défis qui se présentent se constitue. Ce potentiel possède une dimension technique et scientifique, certes, mais en premier lieu il y a sa dimension anthropologique, laquelle est le cœur de notre texte. L'humanité saura-t-elle activer ce potentiel et opérer une sortie par le haut de la situation périlleuse qui est aujourd'hui la sienne ? Ce texte fondé sur la connaissance scientifique ne peut prétendre répondre à cette interrogation. En revanche, à l'opposé de nos sociétés de l'immédiateté, de l'individualisme et de la perte de sens, il esquisse une utopie, un nouvel univers mythique, que je nommerai anthropozoïsme, tournés tout à la fois vers l'urgence des temps présents et vers le très long terme.

A côté de l'apport général de *Bifurcation vers l'éon Anthropozoïque*, accessible à un lecteur non expert, un aspect particulier pourra intéresser des scientifiques qui travaillent sur le système Terre. Il s'agit du statut donné au climat, celui de composante à part entière du système bio-Terre, au même titre que le vivant, les océans, les sols continentaux ou l'atmosphère. Jusqu'à ce jour, dans la littérature scientifique le climat n'est conçu que comme un ensemble de propriétés de la composante atmosphère du système Terre (température, pression, humidité, précipitations, vitesse et orientation des vents...) ⁴⁴⁵. Le nouveau statut donné ici au climat permet un exposé limpide et cohérent des interactions de la complexité du système Terre et facilite une vision globale et dynamique de ces interactions. En particulier, les interactions entre le climat et l'ensemble des autres composantes de ce système sont mises en évidence.

Filiation

Bifurcation vers l'éon Anthropozoïque se situe dans un domaine scientifique, celui des sciences du système Terre. *La géochimie* et *La biosphère* du Russe Vladimir Vernadsky, respectivement publiés en 1924 et 1926, en sont des textes précurseurs. V. Vernadsky y établit une synthèse entre biologie, géologie et chimie autour de la notion de cycles biogéochimiques, dans une vision globale planétaire qui préfigure les sciences du système Terre (Dutrieul, 2016, p.505 à 510). Cependant, le chercheur russe considérait, à tort, que ces cycles étaient quasiment stables, voire éternels, et n'étaient guère influencés par l'évolution de la vie terrestre, à l'exception de l'apparition des humains. Il avança ainsi la thèse selon laquelle les cycles biogéochimiques seraient perturbés, modifiés sous l'influence des humains. Ce qu'il résuma en ces termes « *Une force géologique nouvelle est certainement apparue à la surface terrestre avec l'homme* » (Vernadsky, 1924, p.344).

⁴⁴⁵ Il s'agit plus précisément de moyennes (annuelles, mensuelles...) calculées sur une période donnée, le plus souvent 30 ans. Le climat couvre de plus les variations autour de ces moyennes dont notamment les phénomènes extrêmes.

Introduction

En 2011, Valérie Masson Delmotte, climatologue française dont la contribution au sein du GIEC s'avérera historique, écrivait : « Pour des échelles de temps de plusieurs dizaines de millions d'années, les perturbations des échanges de rayonnement avec l'espace et de la circulation des océans et de l'atmosphère résultent du fonctionnement du soleil et de la tectonique des plaques (position des continents, volcanisme de très grande échelle...) » (Masson-Delmotte, 2011, p.30). Nous pouvons noter que l'évolution du Monde du vivant n'est pas ici pris en considération. Par la suite, nous ferons des observations sur des échelles de temps de l'ordre de centaines de millions d'années. Nous verrons qu'à ces méga-échelles des évolutions du vivant ont donné lieu à fortes perturbations des échanges de rayonnement avec l'espace et de là à des perturbations de la circulation des océans et de l'atmosphère. Plus largement, ces évolutions ont modifié le système Terre dans lequel est intégré le climat.

Actuellement, le climat et le système Terre connaissent une forte perturbation due à une évolution du Monde du vivant, l'apparition des humains. Notre hypothèse est que cette perturbation se traduit en une bifurcation de l'ordre de celles qui se sont précédemment déroulées sur des échelles de l'ordre de centaines de millions d'années, mais qui, cette fois, est fulgurante sur l'échelle des temps géologiques.

Homo-sapiens, nouvelle composante du Monde du vivant, bouleverse ce dernier, ainsi que le climat et l'ensemble de ce que nous appellerons le *système bio-Terre*. Cet événement titanesque et le dernier d'une série de quatre grands bouleversements qui, depuis 4 milliards d'années, ont ponctué l'histoire du vivant et plus largement du système bio-Terre. Chacun de ces grands bouleversements a marqué ou marque l'entrée dans un nouvel éon, la plus haute subdivision des temps géologiques.

Le quatrième éon, le Phanérozoïque, avait débuté il y a 541 millions d'années, par l'apparition d'une multitude de nouvelles espèces vivantes d'une complexité inédite, des animaux, puis des champignons et des plantes vasculaires. Il s'en était suivi un Monde du vivant organisé en *écosystèmes phanérozoïques* où cohabitent animaux, végétaux, champignons, bactéries, archées⁴⁴⁶ et virus. Depuis lors, ces écosystèmes jouent un rôle majeur

446 Les archées sont des organismes unicellulaires, voir plus de précisions à la fin du II de cette 1ère partie.

dans les équilibres et les évolutions du système bio-Terre et de son climat. Dans ce contexte, il y a près de 3 millions d'années sont apparus les premières espèces hypercomplexes qui constituent le genre Homo. Puis, il y a un peu plus de 300 mille ans est apparu Homo-sapiens, aujourd'hui seule espèce survivante du genre Homo.

Avec l'émergence de la révolution du néolithique, il y a 11 mille ans, Homo-sapiens a amorcé une transformation du Monde du vivant qui a pris une forme exponentielle. Des animaux et des végétaux ont été sortis des écosystèmes phanérozoïques pour être domestiqués et soumis à l'humanité. Les écosystèmes phanérozoïques ont été cantonnés à des territoires toujours plus étroits. Aujourd'hui, ils subissent des agressions inédites (extinction de nombreuses espèces, pollutions diverses...) et des perturbations frappent de plein fouet le vivant des océans – dont le rôle est primordial dans la régulation du climat. Plus généralement, Homo-sapiens modifie l'état de l'ensemble du système bio-Terre et a enclenché un réchauffement climatique qui pourrait s'emballer. Il a ouvert un nouvel et cinquième éon, l'*Anthropozoïque*, sans le savoir, sans le vouloir, tout comme d'autres apparitions au sein du vivant avant lui.

De nos jours, une nouvelle page de l'histoire de l'humanité s'ouvre. Une page où le « sans le savoir, sans le vouloir » laisse place au savoir et à la responsabilité. Une page où une singularité forte d'Homo-sapiens émerge, à savoir la capacité à se penser en tant qu'espèce vivante, doublée de la capacité à modifier consciemment, lucidement et collectivement sa place et son rôle au sein du Monde du vivant, dont il est à jamais indissociable. Le tout possède un caractère d'imprévisibilité qui laisse ouvert le champ des possibles. Cette singularité, ce puissant potentiel, se traduira-t-il par une révolution anthropologique et une mobilisation de l'humanité assurant sa survie et le bien vivre de chacune de ses populations, avec pour boussole l'impératif de précaution à l'égard du système bio-Terre ?

1^{ère} partie Le système bio-Terre

Le Monde du vivant, l'atmosphère (sa composition : gaz, aérosols, nuages), les océans (leur composition chimique, les courants marins, les fonds marins...), les sols continentaux (leur composition, l'albédo, l'humidité...), le climat, ces cinq domaines présentent des évolutions extrêmement liées, inséparables. Ils constituent un même système, que j'appellerai le *système bio-Terre*. Au sein de ce dernier, nous le verrons, d'innombrables interactions s'expriment et se traduisent par une évolution sans fin du système pris dans son ensemble. Enfin, l'histoire de ce système est constituée de stades d'évolution lente, entrecoupés de moments de basculement appelés bifurcations⁴⁴⁷.

Pourquoi introduire l'expression *système bio-Terre*, alors que le terme *système Terre* lui pré-existe et bénéficie déjà d'un usage répandu ? Le préfixe *bio* renvoie au Monde du vivant dont l'évolution irréversible ne s'interrompt jamais et conditionne constamment l'état de la totalité du système bio-Terre. Ainsi, le Monde du vivant enclenche ou contribue à enclencher des bifurcations de ce système, notamment les plus importantes d'entre elles. Aussi, nous pourrions définir le système bio-Terre comme l'ensemble des éléments en interaction complexe avec le Monde du vivant, c'est-à-dire comme l'ensemble des éléments qui influencent et sont influencés par le Monde du vivant.

Choix et singularité

Le système bio-Terre a cinq composantes : le Monde du vivant, les océans, les sols continentaux, l'atmosphère et le climat. Ainsi, nous avons considéré que le climat constituait l'une de ses composantes ; cette conception du système Terre, inédite dans la littérature scientifique, permet une présentation limpide, pleinement organisée et cohérente de l'ensemble des interactions de ce système complexe. Autre choix, moins singulier, nous avons inclus les sols marins dans la composante océans, alors qu'ils auraient pu tout aussi bien constituer une sixième composante du système bio-Terre - mais cela aurait alourdi

⁴⁴⁷ Tout au long de notre texte nous entendons par bifurcation un passage entre deux états ou stades d'un système complexe.

notre exposé. L'histoire de la science du système Terre est jalonnée de définitions ou approches diverses de ce dernier. Nous allons maintenant en présenter quelques-unes. Le Monde du vivant en sera constamment une composante. Toutefois, le plus souvent ce ne sera pas le monde du vivant pris dans son ensemble ; en particulier, le vivant marin sera écarté, soit totalement soit en grande partie.

En 2017, dans un article intitulé *Défis environnementaux émergents*, qui portait plus précisément sur le changement climatique, le météorologue français Sylvain Mondon définissait le système-Terre comme un ensemble composé de l'atmosphère, des océans, de la glace, et de la végétation (Mondon, 2017, p.29). Il est notable que nous avons là les composantes du système-Terre qui, en 2017, étaient prises en comptes par la modélisation climatique, du moins par les modèles Système Terre. Ainsi le vivant marin était omis, hormis la végétation, laquelle occupe une place de second rang dans les mers⁴⁴⁸. Or, nous le verrons, le vivant marin est au cœur du système climatique et, en outre, influence fortement l'ensemble du Monde du vivant. Enfin, la glace est ici, chez Sylvain Mondon, une composante en soi, comme chez de nombreux auteurs. Nous verrons que celle-ci joue un rôle majeur dans le système climatique actuel.

En 2013, Alexandre Magnan, géographe et futur auteur du GIEC, écrivait dans un ouvrage portant sur le changement climatique : « *Les grandes composantes du système-Terre – l'atmosphère, l'océan, la cryosphère (les glaces), la lithosphère (l'enveloppe dure de la planète, c'est-à-dire les plaques tectoniques) et la biosphère (les végétaux et les animaux)* » (Magnan, 2013). A. Magnan réduit ici la biosphère aux végétaux et aux animaux, si bien qu'il ne prend pas en considération la plupart du vivant unicellulaire marin, dont les bactéries qui sont au cœur de la vie dans les océans. Enfin, nous pouvons noter que la définition du système Terre est ici similaire à celle de S. Mondon, avec cependant en plus les animaux et les plaques tectoniques.

En 1979, soit neuf ans avant le lancement du GIEC, nous trouvons sous la plume de l'Anglais James Lovelock « (...) *l'hypothèse suggérant que la matière organique, l'air, les*

448 Le vivant marin est très majoritairement composé de bactéries (dont des bactéries organisées en colonies qui ont l'apparence d'algues) et d'animaux.

océans, et la surface de la Terre forment un système complexe susceptible d'être appréhendé comme un organisme unique et ayant le pouvoir de préserver les caractéristiques vitales de notre planète » (Lovelock, 1979, p.16-17). Nous pouvons noter que, au vocabulaire près, nous retrouvons ici exactement quatre des cinq composantes de notre définition du système bio-Terre ; seule manque la composante climat. Cet extrait est tiré d'un ouvrage *Gaïa, a new look at life on Earth*. L'hypothèse présentée par cet extrait sera nommée l'*Hypothèse Gaïa*. Tout au long de cet ouvrage, extrêmement documenté, l'auteur explore cette hypothèse. Mais la notion d'« organisme unique et ayant le pouvoir de préserver les caractéristiques vitales de notre planète » est particulièrement floue et élastique et relève davantage du mythe que de la science. Finalement, cette hypothèse fut propice à des polémiques qui ont pu parfois freiner la prise de conscience de la nature et de la hauteur des risques environnementaux. Dans le même temps, cette hypothèse du pouvoir de Gaïa a motivé ou stimulé certaines recherches qui se sont avérées fécondes.

I. Influences et chocs externes

Le système bio-Terre n'est pas un univers fermé. Il est soumis à l'influence de six phénomènes qui lui sont extérieurs : le mouvement des continents (les évolutions de la position et de la dispersion des surfaces continentales autour du globe terrestre), l'activité volcanique, la formation des montagnes, l'activité solaire, la rencontre d'astéroïdes ou de comètes, les variations de l'orbite terrestre. Ces phénomènes ne sont pas influencés par le vivant terrestre et plus généralement par le système bio-Terre. Ils sont donc bien extérieurs à ce système. Néanmoins, nous verrons qu'ils influencent ce système. Ils sont même la cause ou l'une des causes de certaines bifurcations de ce système.

Système bio-Terre		
Composantes internes	Influences externes	
	Terrestres	Non terrestres
Monde du vivant	Mouvement des continents	Activité solaire

Atmosphère	Activité volcanique	Astéroïdes et comètes
Océans	Érection des montagnes	Orbite de la Terre
Sols continentaux		
Climat		

1. Les mouvements des continents

Les premières surfaces continentales conséquentes se sont formées il y a environ 2,9 milliards d'années. Auparavant la Terre était quasiment entièrement couverte d'océans. Depuis, se déroule un va et vient – dû aux mouvements des plaques tectoniques – qui va de la constitution d'un continent unique ou quasiment unique à son éclatement en plusieurs continents, puis à des dérives de ceux-ci, et enfin à leur rapprochement et à la formation d'un nouveau continent unique. Et ainsi de suite.

L'histoire des continents influence celle du climat. Mais les mécanismes en jeu ont connu de profonds changements au cours des temps géologiques, car ils dépendent du stade de l'évolution du vivant.

Paléozoïque De 541 à 252 millions d'années avant nos jours (Le Paléozoïque est la première ère de l'éon Phanérozoïque)	
Périodes du Paléozoïque	Début
Cambrien	541 millions d'années avant nos jours
Ordovicien	485 millions
Silurien	443 millions
Dévonien	419 millions
Carbonifère	359 millions
Permien	299 millions

Tableau 8

Les continents uniques

Dans cette section, nous allons nous situer après la période du Dévonien, allant de 419 millions d'années à 359 millions d'années avant nos jours. Durant celle-ci, les forêts, écosystèmes alors inédits, sont apparues et ont colonisés les continents.

Sur un continent unique ou quasiment unique, la plupart des terres sont éloignées des mers et de leur influence humide. Les surfaces arides prennent des dimensions démesurées. Les sols sont alors plus clairs qu'une couverture forestière. L'effet albédo (la réflexion de la lumière par les sols) y est important, ce qui favorise un refroidissement climatique global.

Mais il y a aussi et surtout des effets contraires. Tout d'abord, la décomposition des forêts et de leur sol génère du dioxyde de carbone (CO_2) qui rejoint l'atmosphère, ce qui favorise un réchauffement climatique. Ensuite, l'aridité et l'effondrement de la végétation ont pour conséquence une réduction importante de la quantité de dioxyde de carbone capté par la végétation, ce qui favorise à nouveau un réchauffement. Enfin, il y a une diminution du captage du dioxyde de carbone obtenu par érosion des silicates des sols (voir ci-après), ce qui apporte une troisième et majeure contribution à l'augmentation du taux de CO_2 dans l'atmosphère et donc au réchauffement.

Érosion chimique des silicates

Le captage du CO_2 par érosion des silicates des sols continentaux se réalise grâce à de l'eau de pluie chargée en CO_2 . Il est favorisé par la présence de végétation, celle-ci facilitant la pénétration de l'eau dans les sols. Il repose sur des réactions chimiques (voir l'exemple ci-dessous) entre des molécules de silicate, des molécules de CO_2 et des molécules d'eau, et donne naissance à d'autres molécules dont des molécules de carbonate⁴⁴⁹ (lesquelles contiennent les atomes de carbone issues des molécules de CO_2). Ce processus a une influence importante sur le taux de CO_2 dans l'atmosphère et donc sur le climat. En effet, les silicates sont présents dans des quantités considérables : ils composent l'essentiel de la croûte terrestre.

Exemple de l'aluminosilicate de calcium. Une catégorie de labradorites - pierres précieuses dont le nom est inspiré de la région où elles ont été identifiées, le Labrador, au Canada - sont composées d'aluminosilicate de calcium, $\text{CaAl}_2\text{Si}_2\text{O}_8$. L'éro-

⁴⁴⁹ Les molécules de carbonates sont composées de CO_3 et d'un ou plusieurs autres atomes. Par exemple le bicarbonate a pour formule chimique HCO_3 . Le bicarbonate de soude, NaHCO_3 . Le carbonate de calcium, CaCO_3 .

sion chimique de ce silicate repose sur la réaction suivante : $\text{CaAl}_2\text{Si}_2\text{O}_8 + 2\text{CO}_2 + 3\text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4 + \text{Ca} + 2\text{HCO}_3$. Le carbone du dioxyde de carbone (CO_2) est passé dans le carbonate (HCO_3).

Au final, la formation d'un continent unique ou quasiment unique agit en faveur d'un réchauffement climatique global. Plus largement, la formation d'un continent unique, ce phénomène extérieur au système bio-Terre, enclenche des interactions entre les cinq composantes du système bio-Terre et des transformations de chacune d'entre elles. Nous venons de la voir pour le Monde du vivant (forêts), l'atmosphère (CO_2), le climat (réchauffement) et les sols (érosion). Les océans sont eux aussi impactés : augmentation du taux de CO_2 , et donc acidification ; moindre accumulation de carbonates dans les fonds marins issus de l'érosion des silicates continentaux...

Pour finir, arrêtons nous sur ce que j'appelle *le paradoxe du supercontinent froid*. La formation d'un supercontinent unique ou quasiment unique a pour conséquence une augmentation de l'effet de serre terrestre et donc un réchauffement global, nous venons de le voir. Dans le même temps, si ce supercontinent est centré en région polaire, alors son climat polaire n'est pas tempéré par l'océan. Si bien que les terres qui se sont agglomérées pour former ce seul continent auront pu subir un refroidissement. Nous avons alors un réchauffement global qui présente une exception notable, le refroidissement du supercontinent qui est la cause de ce réchauffement global. A contrario, si le supercontinent est centré en zone tropicale, alors il subit un réchauffement extrême.

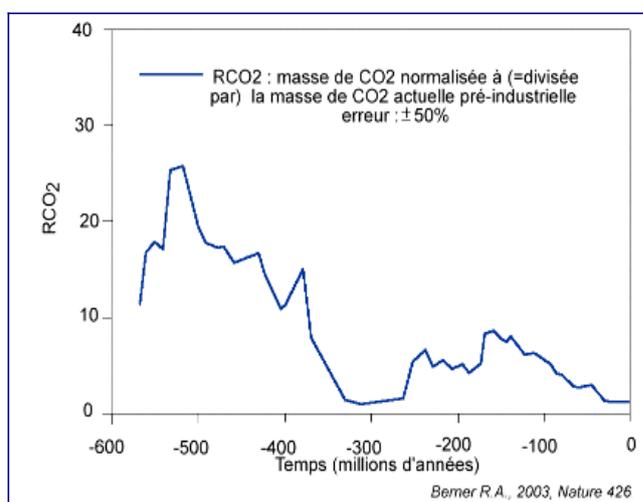
La Pangée et la Grande extinction

Le continent quasiment unique le plus récent, la Pangée, a occupé la période géologique du Permien, allant de 299 millions d'années à 252 millions d'années avant nos jours, puis celle du Trias, qui s'est terminée il y a 201 millions d'années. Au début du Permien, le taux de dioxyde de carbone dans l'atmosphère était situé entre 300 et 400ppm⁴⁵⁰ (proche du taux actuel). Le climat était froid et une partie de la surface terrestre était couverte de glace (l'énergie solaire arrivant sur Terre était alors inférieure de 2 % à ce qu'elle est de nos jours). A la fin du Permien, le

450 ppm : parties par million, en nombre de molécules. Un taux de dioxyde de carbone de 400ppm signifie que parmi un million de molécules d'air sec (les molécules de vapeur d'eau ne sont pas prises en compte) se trouvent 400 molécules de dioxyde de carbone.

taux de CO₂ était multiplié par un facteur estimé entre 5 et 10. Le climat était très chaud et aride. Des espèces vivantes ne survécurent pas ; y compris dans les mers et océans devenus plus chauds et plus acides. C'est alors qu'une activité volcanique colossale se déclencha en Sibérie, avec pour conséquence une intensification de la disparition d'espèces vivantes, et finalement la plus grande extinction de l'éon Phanérozoïque. Le système bio-Terre passait alors de l'ère du Paléozoïque à l'ère du Mésozoïque.

Evolution au cours des 600 derniers millions d'années de la teneur en CO₂



(Berner, 2003)

L'ouverture du Drake

Il y a un peu plus de 30 millions d'années, le continent Antarctique, à l'époque couvert de forêts, s'est séparé du continent Sud Américain, ouvrant le passage du Drake entre les océans Pacifique et Atlantique. Ceci a permis la naissance d'un courant océanique circulaire qui, aujourd'hui encore, fait le tour de l'Antarctique. Ce courant, dit circumpolaire, créa une frontière entre d'un côté l'Antarctique et ses eaux limitrophes, et de l'autre les eaux chaudes situées plus au Nord. Concrètement, depuis lors les courants venant des mers chaudes sont bloqués par le courant circumpolaire. ils ne réchauffent plus l'Antarctique. Dans un contexte de baisse du taux de CO₂, cela eut pour effet la disparition de la forêt antarctique et la constitution de la calotte de glace de ce continent polaire. Dans un duo avec les calottes glacières qui verront le jour au

Nord de la planète, la calotte de l'Antarctique jouera un rôle majeur dans le climat du quaternaire, berceau de l'humanité.

2. L'activité volcanique

J'invite ici le lecteur à opérer un saut vers un passé très lointain. Après le Grand bombardement tardif, qui prit fin il y a 3,8 milliards d'années et sur lequel je reviendrai, la surface de la Terre était stabilisée. Toutefois, l'activité volcanique était intense et donnait lieu à des émissions massives de dioxyde de carbone et d'oxysulfure de carbone (COS), un puissant gaz à effet de serre. C'est pourquoi le climat était particulièrement chaud malgré une activité solaire bien moins intense que de nos jours.

Bien plus tard, durant l'éon Phanérozoïque, l'activité volcanique joua un rôle de premier plan dans des extinctions massives d'espèces animales et végétales. Ce fut en particulier le cas au terme de la première ère du Phanérozoïque, le Paléozoïque, il y a 252 millions d'années, comme nous venons de le voir. Ce fut à nouveau le cas au terme de la deuxième ère du Phanérozoïque, le Mésozoïque, il y a 66 millions d'années. Cette fois, c'était dans l'ouest de l'Inde qu'une gigantesque irruption de volcans se déclencha. Elle s'était exprimée sur une durée de plusieurs centaines de milliers d'années, lorsque survint un événement d'une toute autre nature : l'entrée en collision de la Terre avec un astéroïde de plus de 10km de diamètre. Le cratère d'impact, aujourd'hui situé sous des sédiments marins à proximité de la ville de Chicxulub sur la péninsule du Yucatán au Mexique, mesure 180 kilomètres de diamètre. L'impact ne fut pas que local. L'onde de choc parcourut la planète et durant 50 000 ans les volumes des coulées de lave des irruptions volcaniques indiennes ont plus que doublé. La collision de l'astéroïde combinée à l'activité volcanique produisit des fumées toxiques et des poussières qui se répandirent partout sur la planète. Le climat en fut modifié. Fumées toxiques, poussières, changement climatique..., ont eu pour conséquence la disparition de la moitié des espèces vivantes, dont une grande partie des animaux et la plupart des dinosaures.

3. L'érection des montagnes

Chaque érection d'une montagne entraîne une transformation locale du climat, des sols et du vivant. Au-delà, l'impact est le plus souvent régional, voire planétaire. En Inde, la mousson résulte de la formation de l'Himalaya. De plus, les silicates mis à nu, associés à la pluviosité élevée, font de ce massif un important puits de carbone qui impacte le climat global.

4. Les comètes et les astéroïdes

Les premières centaines de millions d'années de l'histoire de la Terre ont été marquées par de très nombreuses collisions avec des comètes et des astéroïdes de taille conséquente. Puis, alors que leur fréquence s'était fortement réduite, ces événements ont contribué aux bouleversements de l'histoire du système bio-Terre, ce qu'illustre ci-dessus la fin du Mésozoïque.

5. L'activité solaire

Chaque milliard d'années, la quantité d'énergie solaire reçue par la planète Terre augmente de 7 %. Elle a ainsi augmenté de 31 %⁴⁵¹ durant les 4 derniers milliards d'années. La Terre serait donc devenue inhabitable si la hausse du rayonnement solaire n'avait pas été compensée par un autre phénomène, la baisse en tendance longue de la présence de gaz à effet de serre dans l'atmosphère.

L'activité solaire présente en outre des fluctuations de courte durée. Certaines, selon un cycle de onze ans. D'autres, plus longues, peuvent s'inscrire sur plusieurs siècles. Cependant, ces fluctuations possèdent une ampleur et une durée insuffisante pour s'inscrire sur l'échelle des temps géologiques. Elles constituent par contre des facteurs notables de la météo. Elles jouent aussi un rôle dans des variations climatiques de courte durée, jusqu'à plusieurs siècles. Durant le dernier millénaire, l'impact de ces fluctuations sur l'énergie emmagasinée dans l'atmosphère a varié de $\pm 0,3 \text{ W/m}^2$. Ce chiffre doit être comparé à l'impact du dioxyde de carbone émis depuis deux siècles par les activités humaines, qui est aujourd'hui de l'ordre de 2 W/m^2 (Delaygue, 2001). Les émissions de gaz à effet de serre par les humains constituent clairement la toute première cause du réchauffement climatique global.

6. Les variations de l'orbite de la Terre

L'orbite de la Terre autour du soleil et la position de l'axe de la Terre par rapport à son orbite connaissent des variations cycliques. En 1941, le Serbe Milutin Milankovitch publia une théorie du climat où il expliquait les glaciations et les déglaciations des derniers 600 000 ans en se basant sur les variations de trois paramètres orbitaux : l'excentricité, l'obliquité et la précession. (Voir ci-dessous). Ces paramètres, aujourd'hui appelés paramètres de Milankovitch, varient selon des cycles dont la durée s'expriment en dizaines de milliers d'années. M. Milankovitch a ré-

⁴⁵¹ $(1,07)^4 = 1,31$

vélé le lien de causalité qui existait entre les variations cycliques de ces paramètres et les cycles climatiques. Depuis lors, la théorie de M. Milankovitch a été ajustée et complétée, et son application a été étendue à l'ensemble de la période du Quaternaire.

Les paramètres de Milankovitch

L'excentricité

La Terre effectue le tour du soleil en un an, selon une orbite en forme d'ellipse. Cette ellipse varie tout en restant constamment presque circulaire. Il arrive même qu'elle soit circulaire. Le premier des paramètres orbitaux de la Terre est l'excentricité de son orbite, laquelle mesure la distance de celle-ci avec un cercle. L'excentricité d'une ellipse est un nombre situé entre 0 et 1. Si elle est égale à zéro, alors l'ellipse est un cercle. L'excentricité de l'orbite de la Terre varie au cours des temps entre 0 et 0,06. Sa valeur actuelle est de 0,016. Il est heureux que cette excentricité soit constamment très faible. Avec une excentricité élevée, la quantité d'énergie solaire reçue par la Terre varierait fortement au cours d'une même année, au détriment de la vie.

L'obliquité

Le second paramètre orbital de la Terre est l'obliquité. C'est un angle. L'orbite de la Terre est située dans un plan, appelé le plan orbital. La Terre possède un axe, c'est la droite autour de laquelle elle tourne chaque jour. L'obliquité est l'angle entre l'axe de la Terre et une perpendiculaire à son plan orbital. Si l'axe de la Terre était perpendiculaire au plan orbital de la Terre, alors l'obliquité serait de 0°. L'obliquité de la Terre varie, mais peu. Elle reste constamment située entre 22° et 24,5°. L'obliquité est la cause des saisons alternée entre hémisphère Nord et hémisphère Sud. Si l'obliquité était nulle, les cycles météorologiques annuels ne dépendraient que de l'excentricité et ne différencieraient pas le Nord et le Sud.

La précession

Le soleil est l'un des deux foyers de l'orbite ellipsoïdale de la Terre, si bien que selon la période de l'année la Terre est plus ou moins proche du soleil. En ce XXI^e siècle, la Terre est au plus proche du soleil (périhélie) au début du mois de janvier. Elle passe par son point le plus éloigné (aphélie) début juillet.

La place du périhélie sur le calendrier varie selon un cycle d'une durée située entre 19 000 et 23 000 ans. Dans dix mille ans, le périhélie devrait se situer vers le début du mois de juillet, et non plus début janvier. Les variations de cette position sur le calendrier influencent le climat terrestre. Ainsi, et c'est le cas depuis plus de mille ans, les hivers et les étés de l'hémisphère nord sont atténués par cette influence, puisque durant l'hiver du Nord, la Terre est plus proche du soleil, et durant l'été du Nord elle est plus éloignée. Tandis que dans l'hémisphère sud, c'est le contraire, les saisons sont accentuées.

La position du périhélie sur le calendrier est liée au troisième paramètre de Milankovitch, appelé la précession ou précession des équinoxes. L'axe de la Terre tourne autour d'un cône dont l'axe est perpendiculaire au plan orbital de la Terre, sur une durée qui varie entre 19 000 et 23 000 ans. La précession donne la position de l'axe de la Terre sur ce cône.

II. Cycles climatiques du Quaternaire

La période du Quaternaire débuta il y a 2,6 millions d'années et prit fin récemment, avec l'entrée dans un nouvel éon auquel nous donnerons le nom d'éon Anthropozoïque. Tout au long de cette période, les variations des paramètres de Milankovitch se combinaient pour orchestrer des variations du climat terrestre selon des cycles glaciation/déglaciation.

Toutefois, ces cycles n'étaient pas parfaitement réguliers. Tout d'abord, ils se sont succédé sur un fond de refroidissement climatique lent (aux effets négligeables à l'échelle de l'histoire d'Homo-sapiens). Ensuite, la durée des cycles a varié. Dans un premier temps, jusqu'à un million d'années avant nos jours, elle était de l'ordre de 40 000 ans. Puis, durant le dernier million d'années, elle était de l'ordre de 100 000 ans. Enfin, au cours de chacun des cycles, le climat a connu des fluctuations. Pour l'essentiel, ces fluctuations étaient, elles aussi, liées aux paramètres de Milankovitch, sinon à l'activité solaire.

Un problème se présenta à propos des paramètres de Milankovitch. Ceux-ci expliquaient parfaitement les grandes variations cycliques de l'insolation terrestre, c'est-à-dire les variations de la quantité d'énergie solaire reçue au sommet de l'atmosphère et de la répartition de cette

énergie selon les latitudes et les saisons. Cependant, ces variations de l'insolation étaient bien trop faibles pour expliquer à elles seules les cycles glaciation/déglaciation. Un mécanisme d'amplification fut découvert et apporta la solution à ce problème. Il repose sur les variations des niveaux des gaz à effet de serre dans l'atmosphère. En effet, le carbone, composant de base de gaz à effet de serre (CO_2 et CH_4), est massivement stocké dans le sol des continents et dans les fonds marins. Lors d'un réchauffement climatique global initié par les variations des paramètres de Milankovitch, une partie de ce carbone est relâché dans l'atmosphère, cela sous la forme de gaz à effet de serre (CO_2 et CH_4), ce qui amplifie le réchauffement. A l'opposé, lors d'un refroidissement climatique initié par les variations des paramètres de Milankovitch, du dioxyde de carbone est soustrait de l'atmosphère et vient accroître les stocks de carbone des sols continentaux et des fonds marins, ce qui amplifie le refroidissement.

La fonte du pergélisol

Lors d'un réchauffement climatique, une part conséquente du carbone relâché dans l'atmosphère provient du pergélisol, les terres gelées du grand Nord de notre planète. Avec la hausse des températures, des étendues de ce dernier se désintègrent. Ceci donne lieu à la fonte d'hydrates⁴⁵² de méthane présents dans le pergélisol, d'une part, et, d'autre part, à la formation de mares thermokarst où des micro-organismes produisent du méthane (dans les fonds des mares anoxiques) et du dioxyde de carbone (là où se trouvent de l'oxygène). De la partie inférieure de ces mares, des archées méthanogènes émettent du méthane, alors que d'autres micro-organismes, plus proches de la surface de l'eau, émettent du dioxyde de carbone. Ces mares font leur apparition à chaque déglaciation.

Les archées

Les archées sont des organismes unicellulaires présents dans les lieux les plus divers de la planète, allant du fond des océans au microbiote des êtres humains. Le mot archée vient du grec ancien ἀρχαῖος, qui signifie originel, primitif. Les premières ar-

⁴⁵² Un hydrate de méthane est une molécule de méthane emprisonnée dans une cage d'eau glacée. Lorsque l'une de ces cages fond, elle libère sa molécule de méthane.

chées sont apparues dans les océans, très tôt dans l'histoire de la Terre, il y a vraisemblablement 3,5 milliards d'années, sinon davantage.

Parmi les archées, certaines espèces sont méthanogènes. Ces dernières ont joué un rôle particulièrement important dans l'histoire du climat, notamment jusqu'à il y a 2,4 milliards d'années⁴⁵³. Les archées méthanogènes ne survivent que dans des milieux où il n'y a pas ou peu d'oxygène. Toute zone d'eau (mers et océan, lac, étang, mare, marais, rizière...) où il n'y a pas ou peu d'oxygène, est propice au développement de populations d'archées méthanogènes, dès lors que des nutriments nécessaires à leur alimentation sont disponibles. De nos jours, elles sont naturellement présentes dans les sols marins, notamment sous les océans des régions chaudes - tropicales ou équatoriales. Actuellement, des populations d'archées méthanogènes se multiplient avec le développement de zones mortes et la fonte de pergélisol.

Jusqu'à il y a une cinquantaine d'années, il était considéré que les archées constituaient plusieurs familles au sein du règne des bactéries, dont la seule bien connue était celle des « bactéries méthanogènes ». C'est seulement à partir de 1977 que s'est progressivement imposée la distinction, fondée sur d'importantes différences génétiques et biochimiques⁴⁵⁴, entre le règne des archées (d'abord appelé règne des archéobactéries) et celui des bactéries (Woese et Fox, 1977 ; Garcia, 1998). Pourtant, dans certains manuels il peut encore être question d'archéobactéries méthanogènes ou même de bactéries méthanogènes, au lieu d'archées méthanogènes.

III. Bouleversement du climat

Le climat a amorcé un profond changement et se situe désormais hors du système cyclique du Quaternaire qui a eu cours pendant 2,6 millions d'années. Cela est illustré par une présence de carbone dans l'atmosphère d'une ampleur jamais atteinte depuis au moins 3,5 millions d'années. Dans le futur, le climat pourrait à nouveau présenter une relative stabilité associée à des varia-

453 Voir 2e partie, Le climat sous influence du vivant.

454 Les réactions chimiques du métabolisme d'une archée diffèrent de celles du métabolisme d'une bactérie.

tions cycliques. Mais cette relative stabilité serait très probablement de nature différente de celle du Quaternaire.

Aujourd'hui, le carbone n'est plus seulement une source d'amplification des changements climatiques, comme cela a pu être le cas durant le Quaternaire. En effet, Homo-sapiens émet lui-même massivement du carbone dans l'atmosphère (CO₂ et CH₄), ce qui constitue la cause initiale d'un réchauffement climatique global. Ce dernier présente aujourd'hui des premiers signes d'amplification, notamment par des émissions dites naturelles de dioxyde de carbone et de méthane (fonte de pergélisol (Cailloce, 2015 ; Farquharson et al., 2019), déstabilisation d'hydrates de méthane des fonds de l'océan Arctique (Shakhova, 2010)), auquel pourrait s'ajouter une diminution de l'absorption de dioxyde de carbone par la végétation terrestre ou par le phytoplancton marin.

Le changement climatique en cours est à observer dans sa singularité. Tout d'abord, il y a le contexte d'une période inter-glaciaire aux températures élevées. Sur ce contexte se greffent des émissions anthropiques de gaz à effet de serre qui entraînent une surchauffe. Puis, cette dernière enclenche des émissions naturelles de gaz à effet de serre qui menacent de prendre une dimension sans commune mesure avec celles rencontrées durant le Quaternaire. Enfin, le vivant, que ce soit celui des continents ou celui des océans, régulateur majeur des taux de CO₂ et de CH₄ de l'atmosphère, subit de fortes perturbations (Voir, par exemple, dans le corps de la thèse, troisième partie, sous-chapitre 2.8., *Le vivant marin méthanogène*). D'où, *in fine*, un risque d'emballage du réchauffement climatique.

IV. Un système complexe

Monde du vivant, atmosphère, océans, sols continentaux et climat sont les cinq composantes d'un **système complexe**, le système bio-Terre. Toute modification de l'une de ces composantes entraîne une modification de chacune des quatre autres. En retour, la modification de chacune de ces quatre dernières entraîne des modifications de la première. Finalement, dès lors qu'une des composantes du système bio-Terre connaît un changement, s'opère alors une évolution de l'ensemble du système, sous l'effet d'interactions en cascade.

Une révolution totale

Une révolution de la pensée, la révolution du complexe, s'est amorcée au milieu du XXe siècle. Elle permet d'étudier des objets que le plus souvent les disciplines scientifiques n'ont pas vocation à aborder, par exemple le système bio-Terre, une société humaine ou encore l'humanité prise dans son ensemble (Morin, 2001). La pensée du complexe se nourrit des résultats des sciences segmentées en disciplines, mais va au-delà. Elle est porteuse d'un changement de nos modes de pensée et constitue un outil puissant qui permet de modifier l'ensemble des représentations, y compris celles que chacun possède de lui-même, des autres et de ses groupes d'appartenance. Elle est indispensable à la conception et la mise en œuvre de réponses à de nombreux problèmes. Au-delà de la pensée et des représentations, la révolution du complexe se traduira dans l'agir, aux plans culturel, social et politique ; en ce sens, cette révolution en marche est une révolution totale. Cette révolution est indispensable pour adapter nos systèmes mentaux, nos comportements et notre agir collectif planétaire à la situation créée par la bifurcation en cours du système bio-Terre.

Des approches et des développements de la pensée du complexe assez divers existent. Cela est en partie dû au fait que la pensée du complexe est souple et s'adapte à l'objet sur lequel elle se pose. Certains concepts lui sont associés. Tout d'abord, celui d'**interaction**, qui est au fondement de tout système complexe. Puis, par exemple, ceux de **bifurcation**, de **rétroaction**, de **boucle rétroactive** et d'**émergence**, que nous retrouverons ici à propos du système bio-Terre. Par ailleurs, des objets ou des systèmes extérieurs à un système complexe peuvent éventuellement agir sur celui-ci. Enfin, de nombreux systèmes complexes sont en évolution incessante, le plus souvent lente, parfois cyclique, avec d'éventuels moments de rupture appelés bifurcation.

Aujourd'hui, le système bio-Terre est engagé dans un processus d'évolution profonde. Sorti de son état du Quaternaire, il emprunte une **bifurcation**. A la source de cette dernière, nous avons l'**émergence** d'Homo-sapiens. Cette bifurcation devrait déboucher sur un nouvel état d'évolution lente ; mais pourrait aussi, à l'opposé, prendre la forme d'une longue dérive chaotique. Cette bifurcation est nourrie de **boucles rétroactives**. Ainsi le réchauffement climatique global entraîne la fonte de pergélisol qui s'accompagne d'émissions de méthane et de dioxyde

de carbone. En retour, ces gaz à effet de serre se répandent dans l'atmosphère, d'où une intensification du réchauffement climatique et de là une accélération de la fonte de pergélisol. Et ainsi de suite. La rétroaction est ici dite positive, ce qui signifie qu'elle amplifie le phénomène de départ, le réchauffement climatique.

La rétroaction positive de la fonte du pergélisol est aujourd'hui amorcée. Cependant, à ce jour les connaissances scientifiques ne nous informent pas sur ce que sera sa temporalité et son ampleur au cours du XXI^e⁴⁵⁵ ; qui plus est, au-delà. Plus largement, le système bio-Terre et son climat sont aujourd'hui dans une configuration inédite, qui n'a pas de semblable dans le passé proche ou lointain. Les émergences et les évolutions au cours du XXI^e siècle et au-delà sont largement imprévisibles.

455 Voir Farquharson et al. (2019) et plus largement le sous-chapitre III.2.4 de la thèse.

2^e partie L'éon Anthropozoïque

I. Éons, ères, périodes...

Les géologues découpent l'histoire de la Terre en quatre éons : l'Hadéen (éon des enfers), l'Archéen (éon du commencement, de l'origine), le Protérozoïque (éon d'avant les animaux) et le Phanérozoïque (éon des animaux visibles). Les éons sont divisés en ères, lesquelles sont à leur tour divisées en périodes, puis celles-ci en époques, etc.

Les éons	A leurs commencements
Hadéen	Naissance de la Terre 4,55 milliards d'années
Archéen	Fin du Grand bombardement tardif Vers 3,8 milliards d'années
Protérozoïque	Grand événement d'oxygénation 2,45 à 2,2 milliards d'années
Phanérozoïque	Explosion cambrienne 541 à 520 millions d'années

II. L'Hadéen et l'Archéen

1. Instabilité

La Terre s'est formée il y a environ 4,55 milliards d'années. S'ouvrit alors le premier éon, l'Hadéen, éon des enfers. Ce nom renvoie à une planète Terre dont l'intérieur était bien plus chaud que de nos jours et dont la trajectoire croisait celles d'une multitude d'objets divers du tout jeune système solaire. A la fin de l'Hadéen, de 4,1 milliards à 3,8 milliards d'années, un bouleversement au sein du système solaire propulsa vers le centre de celui-ci un très grand nombre de comètes issues de la ceinture de Kuiper (dont la distance au soleil est plusieurs di-

zaines de fois supérieure à celle de la Terre au soleil). La conséquence fut un gigantesque bombardement de la surface de la Terre, le Grand bombardement tardif.

2. Vers l'apparition du vivant

A l'issue du Grand bombardement tardif s'ouvrit le deuxième éon, l'Archéen. La surface terrestre était enfin durablement stabilisée, grâce à une réduction de l'énergie interne de la Terre et à un espace interplanétaire bien moins encombré. Toutefois, l'activité volcanique était intense. Cette dernière émettait du dioxyde de carbone en très grande quantité auquel s'ajoutait de l'oxy-sulfure de carbone (COS), gaz à effet de serre extrêmement puissant ; d'où un climat très chaud malgré un rayonnement solaire inférieur d'environ 30 % au rayonnement actuel. Enfin, un océan couvrait quasiment l'ensemble de la surface de la Terre. Les conditions de l'apparition et d'un premier stade de développement de la vie étaient réunies.

3. Le climat sous influence du vivant

Durant l'Archéen, le taux de dioxyde de carbone amorça une longue décrue. Les raisons étaient de trois ordres. Tout d'abord une baisse de l'activité volcanique. Ensuite une captation par photo-synthèse de ce dioxyde par les cyanobactéries, apparues il y a au moins 3,5 milliards d'années. Enfin une captation de ce dioxyde par érosion chimique des silicates des premiers sols continentaux. Cependant, jusqu'à la fin de l'Archéen, il y a 2,45 milliards d'années, la température terrestre resta élevée (ou quasiment toujours élevée), au moins entre 30°C et 50°C, car le méthane produit par des archées méthanogènes, apparues elles aussi il y a au moins 3,5 milliards d'années, avait pris le relais du dioxyde de carbone manquant. Ainsi, le premier rôle déterminant du Monde du vivant sur le climat a été joué par des archées méthanogènes. Au même moment, dans les océans, les cyanobactéries émettaient de l'oxygène. Mais durant des centaines de millions d'années, et jusqu'à la fin de l'Archéen, cela n'eut pas d'impact sur le climat, car l'oxygène produit était pour l'essentiel capté par l'oxydation de roches océaniques.

4. Le premier stade du système bio-Terre

A la suite de la formation des premiers continents, il y a 2,9 milliards d'années, les cinq composantes du système bio-Terre étaient en place et interagissaient. Ce système était né. Il entrait dans son premier stade. Dès lors le climat était largement déterminé par les quatre autres composantes :

- **Monde du vivant** : les archées méthanogènes entretenaient un climat particulièrement chaud, tandis que les cyanobactéries absorbaient du dioxyde de carbone ;

- **océans** : des roches sous-marines absorbaient l'oxygène produit par les cyanobactéries, ce qui assurait la survie des archées méthanogènes (pour lesquelles l'oxygène est toxique) et la continuité de leur influence sur le climat ;

- **sols continentaux** : l'érosion des silicates captait du dioxyde de carbone ;

- **atmosphère** : sa composition chimique était au cœur du système climatique.

Réciproquement, le climat agissait sur les quatre autres composantes du système bio-Terre. Les pluies déterminaient l'intensité de l'érosion des **sols continentaux** et de la captation de dioxyde de carbone de l'**atmosphère** par ces mêmes sols. Par ricochet, le climat influençait le taux de dioxyde de carbone dans les **océans** (lequel est lié au taux de dioxyde de carbone de l'atmosphère), et de là influençait l'acidité des océans, laquelle impacte le **vivant**. Aussi, bien évidemment le climat influençait directement le vivant.

Nous notons que la présentation des interactions données ici n'est pas exhaustive.

III. De l'Archéen au Protérozoïque

1. Le Grand événement d'oxygénation

Dès lors que le travail d'oxydation des roches océaniques fut achevé, l'oxygène généré par les cyanobactéries se répandit dans l'océan et l'atmosphère. Le Grand événement d'oxygénation était enclenché. Un nouvel éon s'ouvrait, le Protérozoïque.

Cet oxygène intoxiqua mortellement la plupart des archées méthanogènes des océans et, de plus, réduisit la durée de vie du méthane dans l'atmosphère⁴⁵⁶, si bien que le taux de ce puissant gaz à effet de serre chuta fortement. En outre, l'oxygène élimina de l'atmosphère l'oxysulfure

⁴⁵⁶ Le méthane n'est pas stable dans l'atmosphère. Il a actuellement une durée de vie médiane d'environ douze ans. Cette durée de vie a varié au cours de l'histoire terrestre, en fonction décroissante du taux d'oxygène.

de carbone. D'où un refroidissement global qui déboucha rapidement sur la glaciation huro-nienne, le premier de trois épisodes de « Terre boule de neige » où la surface de la Terre était presque totalement recouverte de glace.

Par ailleurs, le Grand événement d'oxygénation créa les conditions de l'apparition et d'un premier stade de développement d'organismes pluricellulaires eucaryotes - ancêtres des ani-maux, des végétaux et des champignons. Parmi ceux-ci, certains étaient dotés d'un système res-piratoire consommateur d'oxygène et émetteur de dioxyde de carbone.

Les Eucaryotes

Le Monde du vivant est classiquement divisé en six règnes. Quatre d'entre eux constituent les eucaryotes, ce sont les animaux, les végétaux, les champignons et les protistes. Les deux autres, les archées et les bactéries, constituent les procaryotes. Les eucaryotes et les procaryotes sont parfois appelés les deux « empires du vi-vant ». Les cellules des eucaryotes sont pourvues d'un noyau, contrairement à celles des procaryotes. La plus ancienne trace d'eucaryote, découverte à ce jour, date d'il y a 2,7 milliards d'années. Il s'agissait alors d'organismes unicellulaires. Quelques centaines de millions d'années plus tard, ils prirent leur premier essor grâce au Grand événement d'oxygénation.

En 2008, au Gabon, ont été découvertes des traces d'eucaryotes probablement pluricellulaires datant de 2,1 milliards d'années et pouvant atteindre jusqu'à 10 à 12 cm. Ce serait les plus anciennes traces d'organismes pluricellulaires trouvées à ce jour. Toutefois, une autre hypothèse à cours : il pourrait s'agir de colonies symbio-tiques d'eucaryotes unicellulaires⁴⁵⁷.

Procaryotes	Eucaryotes
Bactéries	Animaux
Archées	Végétaux (plantes et algues)
	Champignons

457 Philippe Janvier. *Organismes Fossiles Pluricellulaires Premiers*. Encyclopædia Universalis [en ligne], consulté le 21 octobre 2022. URL : <http://www.universalis-edu.com.ressources-electroniques.univ-lille.fr/encyclopedie/premiers-organismes-fossiles-pluricellulaires/>

	Protistes
--	-----------

Le Grand événement d'oxygénation eut pour conséquence un nouvel état du système bio-Terre. Chacune des cinq composantes de ce dernier et les interactions entre celles-ci avaient subi des changements profonds. De nouvelles évolutions, le plus souvent relativement lentes, allaient se déployer tout au long de l'éon Protérozoïque.

2. La montée en puissance de l'oxygène

A la fin du Grand événement d'oxygénation, la progression du taux d'oxygène dans l'atmosphère n'avait opéré qu'une première étape. Il est estimé qu'il était situé entre 5 % et 18 % de sa valeur actuelle. Celle-ci est égale à 21 % en volume : sur 100 molécules d'air sec, 21 sont actuellement de l'oxygène, plus exactement du dioxygène (O₂). Puis le taux d'oxygène a notamment connu de fortes augmentations lors des déglaciations des deux derniers épisodes de « Terre boule de neige ». Ceux-ci se déroulèrent dans les derniers temps du Protérozoïque. Le tout dernier prit fin il y a 630 millions d'années. Il fut suivi d'une diversification et d'une expansion importante des organismes pluricellulaires, prémices du Phanérozoïque, favorisées par un niveau important d'oxygène, proche du taux actuel. Parmi les organismes pluricellulaires nouvellement apparus, se trouvaient notamment les premiers animaux. De ces derniers, les traces les plus anciennes, découvertes à ce jour, datent d'il y a 580 millions d'années.

IV. Du Protérozoïque au Phanérozoïque

1. Une bifurcation d'une durée de 182 millions d'années

Le déploiement des animaux

Le Protérozoïque prit fin avec l'Explosion cambrienne, il y a 541 millions d'années. Selon Jean Vannier : « *L'Explosion Cambrienne désigne l'apparition soudaine à l'échelle des temps géologiques d'anatomies entièrement nouvelles qui préfigurent déjà les grands groupes d'animaux actuels. Cet événement évolutif sans précédent, attesté par de nombreuses données paléontologiques et moléculaires, marque un tournant décisif dans l'évolution de la vie sur notre*

planète. »⁴⁵⁸. S'ouvrit alors le Phanérozoïque. Le vocabulaire des géologues met l'accent sur l'évolution du monde animal : zoïque vient d'un terme grec signifiant « de l'animal ». L'éon Protérozoïque signifie étymologiquement l'éon d'avant les animaux (lesquels apparurent à la toute fin de cet éon). L'éon Phanérozoïque signifie étymologiquement celui des animaux visibles (par contraste avec les animaux apparus à la fin du Protérozoïque qui étaient, sauf exceptions, de très petite taille).

Le déploiement des écosystèmes phanérozoïques

Du point de vue de la pensée du complexe, la bifurcation du système bio-Terre entre le Protérozoïque et le Phanérozoïque ne se réalisa pas en un million d'années ni même sur le seul temps de l'explosion cambrienne (21 millions d'années), mais sur une durée d'environ 182 millions d'années. Au départ il y a bien l'explosion cambrienne, de 541 millions à 520 millions d'années avant nos jours, qui vit se déployer la nouvelle composante du vivant que constituaient les animaux. A l'arrivée, il y a l'apparition des plantes vasculaires (possédant racines, vaisseaux et sève) et leur colonisation des continents. Plus exactement, il s'agissait de la colonisation des continents par des écosystèmes d'un genre nouveau, que nous appellerons écosystèmes phanérozoïques, où animaux, végétaux, champignons (autre composante récente du vivant), bactéries, archées, protistes et virus sont interdépendants dans un tout d'une complexité inédite. Cette colonisation se déroula tout au long de la période du Dévonien (419 millions à 359 millions d'années avant nos jours). Elle modifia profondément les échanges de carbone entre l'atmosphère, le vivant, les sols continentaux et les océans. Plus largement, les interactions entre les cinq composantes du système bio-Terre subirent un bouleversement. A l'issue de cette colonisation, et durant près de 360 millions d'années, le Monde du vivant, y compris marin (Mahé, 2012), a conservé une forme générale relativement stable, organisée en écosystèmes phanérozoïques. Certes, des évolutions du vivant se poursuivirent et il y eut plusieurs extinctions massives. Mais ces dernières furent suivies du retour d'une organisation du vivant en écosystèmes phanérozoïques, et ne se traduisirent pas par un changement d'éon. Par contre, deux extinctions massives, abordées dans notre premier chapitre, correspondent aux changements d'ère de l'éon Phanérozoïque.

458 *L'explosion Cambrienne*. Jean Vannier. CNRS. Université Claude-Bernard, Lyon I. Site du CNRS.

<http://www.cnrs.fr/cw/dossiers/dosevol/decouv/articles/chap2/vannier.html> Vu le 21 octobre 2022.

Éon Phanérozoïque		
Nouvelle classification	Ancienne classification	Débuts
Ère du Paléozoïque (anciens animaux)	Ère primaire	541 millions d'années avant nos jours Explosion cambrienne
Ère du Mésozoïque (animaux intermédiaires)	Ère secondaire	252,2 millions d'années Grande extinction
Ère du Cénozoïque (nouveaux animaux)	Ères tertiaire et quaternaire	66 millions d'années Grande extinction

L'ère du Cénozoïque est la réunion des ères tertiaire et quaternaire de l'ancienne classification. Selon cette dernière, l'ère tertiaire s'arrêtait il y a 2,6 millions d'années, date où s'ouvrait l'ère quaternaire. Dans la nouvelle classification, le Quaternaire s'ouvre toujours il y a 2,6 millions d'années, mais son statut est maintenant celui d'une période, la dernière de l'ère du Cénozoïque.

2. Nouveau stade du vivant, nouvel état du système bio-Terre, nouveau fonctionnement du climat

Le système bio-Terre

Une première colonisation des continents par diverses espèces vivantes telles que des bactéries, des lichens (apparus durant la période du Cambrien⁴⁵⁹), etc., avait précédé la colonisation par les écosystèmes phanérozoïques. Puis, cette dernière se déroula progressivement tout au long du Dévonien. Les premiers spécimens de plantes vasculaires sont apparus au début de cette période, d'abord celles de petite taille, puis des fougères géantes et des arbres. Les effets de la colonisation par les écosystèmes phanérozoïques furent progressifs mais majeurs sur la composition de l'atmosphère, sur l'érosion des sols et sur le climat. Les océans furent de même impactés : les cours d'eau emportaient à la mer une part importante du surplus de matière issu de l'érosion des sols ; une baisse du taux de CO₂ de l'atmosphère se traduisit par une réduction de l'acidité des mers ; etc. De plus, le vivant des océans connut lui aussi une évolution radicale, dont une colonisation par les animaux et les champignons, et finalement une organisation en écosystèmes phanérozoïques ; ce qui contribua à la bifurcation de l'ensemble du système bio-Terre.

459 Confer Tableau 8

Une stabilisation du taux d'oxygène

La colonisation de quasiment l'ensemble de la surface terrestre par les écosystèmes phanérozoïques se traduit par une relative stabilité du taux d'oxygène dans l'atmosphère. Depuis lors, celui-ci se situe à l'intérieur d'une fourchette, entre 15 % et 25 % (avec quelques pointes qui auraient ponctuellement approché 35%). La raison de cette relative stabilité est l'existence de phénomènes de stabilisation encore appelés rétroactions négatives. Par exemple, lorsque ce taux descend sous un certain niveau, certains organismes vivants consommateurs d'oxygène sont asphyxiés (ce qu'illustrerait, selon certaines thèses, la fin des espèces géantes de dinosaures), ce qui enclenche une remontée de ce taux. A l'opposé, lorsque ce taux dépasse un certain niveau, des incendies - dont le développement est favorisé par un forte présence d'oxygène - consomment de l'oxygène, d'une part, et, d'autre part, anéantissent des organismes vivants émetteurs d'oxygène ; d'où une chute de ce taux.

Le climat au Dévonien

Lors de la colonisation des continents, deux effet opposés s'exprimèrent sur le climat. Le premier, une chute du taux de dioxyde de carbone dans l'atmosphère. En effet, en se développant le tapis végétal consomme du CO₂ et, en outre, il favorise une érosion chimique des roches. Ainsi, durant le Dévonien, en approximativement 60 millions d'années, le taux de dioxyde de carbone dans l'atmosphère a été divisé par trois. Il est tombé de 3000ppm à 1000ppm. Une forte baisse des températures aurait donc dû se produire à la surface de la Terre. Ce serait sans compter sur le second effet de la colonisation des continents sur le climat, à savoir la diminution de l'albédo. En effet, au début du Dévonien, les continents avaient la couleur claire d'un sol désertique, qui réfléchit 30 % du rayonnement lumineux (Braconnot et al., 2020, p.7). A la fin, ils avaient la couleur foncée d'une couverture forestière, qui ne réfléchit que 10 % du rayonnement lumineux (Braconnot et al., 2020), et absorbe donc davantage d'énergie solaire. Finalement, la diminution du taux de dioxyde de carbone (refroidissement) a été compensée par une plus grande absorption de l'énergie solaire par la surface des continents (réchauffement). Et, hormis durant quelques événements climatiques relativement brefs, la période du Dévonien a connu un climat plutôt stable. Vint ensuite la fin du Dévonien, provoquée par le ralentissement du changement de couleur des sols, alors que le tapis végétal continuait à nettement s'étoffer. Si

bien que l'absorption de l'énergie solaire n'augmentait plus que lentement, pendant que les forêts pompaient toujours abondamment le dioxyde de carbone de l'atmosphère. Le facteur de réchauffement s'effaçait nettement devant le facteur de refroidissement. Il s'en est suivi un refroidissement climatique global.

Cette présentation du climat durant le Dévonien ne peut prétendre s'étendre à l'ensemble de l'éon Phanérozoïque. En revanche, sans chercher l'exhaustivité, elle illustre des dimensions centrales du rôle et de la mécanique des écosystèmes phanérozoïques dans les climats de ce quatrième éon.

V. Du Phanérozoïque à l'Anthropozoïque ?

1. Les bifurcations entre éons

Éon, ère, période, époque... ont été conçus par les géologues sur la base de la stratigraphie. Nous sommes là dans le champ d'une discipline scientifique. La pensée du complexe se nourrit de la production de disciplines scientifiques, mais ne se réduit pas à l'une d'entre elles, ni à la simple juxtaposition de celles-ci. Appliquée au système bio-Terre, elle engendre une approche de l'histoire de la Terre où les passages d'un éon à un autre, d'une ère à une autre, d'une période à une autre ou d'une époque à une autre, correspondent à des bifurcations de ce système, et ne sont pas fondés sur les seules données issues de la géologie et de la stratigraphie. Ces bifurcations sont plus ou moins importantes, mais chacune ouvre un état inédit du système bio-Terre. Les plus conséquentes consacrent les passages entre éons.

Durant l'Archéen, des populations d'organismes unicellulaires ont émergé, se sont développées et ont constitué un premier stade du Monde du vivant.

Le Protérozoïque s'ouvrit avec la Grande oxygénation et l'intoxication d'une large part du vivant. Il est caractérisé par les premiers développements d'organismes eucaryotes multicellulaires.

Le Phanérozoïque, après une bifurcation qui s'étendit sur 182 millions d'années, sera caractérisé par un Monde du vivant organisé en écosystèmes phanérozoïques.

Depuis l'Archéen, chaque nouvel éon est caractérisé par l'émergence de nouveaux organismes vivants qui « *marquent un tournant décisif dans l'évolution de la vie sur notre planète* »⁴⁶⁰ et transforment profondément et de façon irréversible le Monde du vivant et plus largement le système bio-Terre.

2. L'hypothèse de l'éon Anthropozoïque

Au sein de l'Union internationale des sciences géologiques (UISG), depuis 2012 la Commission internationale de stratigraphie étudie la proposition de reconnaître l'entrée dans une nouvelle époque géologique, l'Anthropocène. Cela fait débat. Une controverse est ouverte au sein de la discipline. A ce sujet, selon la commission de stratigraphie de la Royal Geological Society de Londres, « *la combinaison d'extinctions, de migrations mondiales des espèces et la généralisation du remplacement de la végétation naturelle par des monocultures agricoles produit un signal bio-stratigraphique dont les effets seront durables, car l'évolution future aura lieu à partir des populations survivantes (déplacées bien souvent par l'homme). En d'autres termes, l'évolution elle-même a été orientée vers une nouvelle trajectoire.* » (Lorius et Carpentier, 2010).

Du point de vue de la complexité, la question n'appelle pas de débat : le système bio-Terre entre bien dans une nouvelle époque. Par contre, une interrogation porte sur la plus haute subdivision des temps géologiques : le système bio-Terre entre-t-il dans un nouvel éon ? Autrement dit, l'apparition de l'espèce humaine marque-t-elle « *un tournant décisif dans l'évolution de la vie sur notre planète* » qui se traduit par une modification profonde et durable du Monde du vivant et une bifurcation majeure du système bio-Terre ? Répondre à cette interrogation serait prématuré. En effet, à ce jour les connaissances scientifiques laissent ouverts différents scénarios, dont cinq que nous présentons ici brièvement :

- 1^{er} scénario. L'humanité pourrait finalement n'avoir qu'une existence éphémère, et disparaître au cours de la bifurcation du système bio-Terre qu'elle a elle-même engendrée. Cette bifurcation pourrait alors déboucher sur un nouveau stade du système bio-Terre où des écosystèmes, qui ne présenteraient pas de rupture avec les écosystèmes phanérozoïques, couvriraient à nouveau quasiment l'ensemble de la planète. Il n'y aurait alors pas de changement d'éon.

460. *L'explosion Cambrienne*. Jean Vannier. CNRS. Université Claude-Bernard, Lyon I. Site du CNRS. <http://www.cnrs.fr/cw/dossiers/dosevol/decouv/articles/chap2/vannier.html> Vu le 21 octobre 2022.

- 2^e scénario. Ici le futur du système bio-Terre est similaire à celui du 1^{er} scénario, mais l'humanité perdurerait en petit nombre.

- 3^e scénario. L'humanité n'aurait qu'une existence éphémère, mais néanmoins la bifurcation en cours du système bio-Terre prendrait une ampleur de première importance – où, par exemple, se produirait un emballement climatique majeur - et déboucherait sur un Monde du vivant profondément et durablement nouveau. Un nouvel éon, post-humain, serait alors ouvert.

- 4^e scénario. Similaire au précédent, mais l'humanité perdurerait en petit nombre.

- 5^e scénario. L'humanité perdurerait avec une population nombreuse, marquant un tournant décisif dans l'évolution de la vie et jouant un rôle central tout au long d'un nouvel éon.

Désormais, nous nous placerons dans l'hypothèse de ce 5^e scénario, car c'est celui qui peut sembler le plus probable et, aussi et surtout, à mon sens la perspective de ce scénario est un facteur, un catalyseur, voire la condition, d'une mobilisation et d'une métamorphose de l'humanité vers le nouvel humanisme dont il sera question plus loin. Et, finalement, si ce 5^e scénario, ce nouvel éon dont le moteur serait l'humanité, est un futur possible ou probable, et non pas une connaissance scientifique du futur, c'est aussi un choix, une volonté, une ambition.

Conformément aux noms donnés aux précédents éons, centrés sur les animaux, il convient que ce nouvel éon soit dénommé éon Anthropozoïque⁴⁶¹ (celui des animaux humains). L'Anthropocène (terme issu des mots grecs « anthropos », être humain, et « kainos », récent) en constitue la première période, celle de la bifurcation du Phanérozoïque vers l'Anthropozoïque.

461 Le terme Anthropozoïque n'est pas un néologisme. Il a été introduit en 1873, par le géologue italien l'abbé Antonio Stoppani, professeur au Muséum de Milan, dans son ouvrage *Corso di geologia* (https://archive.org/details/bub_gb_Mb40AERZXUMC/page/n1/mode/2up). Il désigne la période géologique caractérisée par l'apparition du genre Homo (l'être humain). Par continuité, aujourd'hui il désigne la période du quaternaire ; mais son usage est devenu rare. De mon côté, ce terme dont je n'avais pas connaissance, m'est venu à l'esprit très naturellement lorsque j'ai voulu dénommer le nouvel éon que je venais de découvrir. En effet, les noms des deux éons précédents se terminent par 'zoïque' et désignent un stade du règne animal ; or le nouvel éon est caractérisé par l'action de l'espèce animale Homo, je l'ai donc baptisé Anthropozoïque. Puis, j'ai fait tourner un moteur de recherche afin de savoir si ce mot était déjà utilisé. J'ai alors découvert que oui, ce terme était utilisé, mais était en voie de désuétude. Aussi et surtout, il représentait une période, le Quaternaire, durant laquelle Homo n'avait pas encore amorcé une bifurcation du système bio-Terre, mais était uniquement existant et sans impact géologique ; ce terme pouvait donc sembler utilisé à mauvais escient.

Le capitalisme sera vraisemblablement le marqueur d'une des subdivisions géologiques de l'Anthropocène, ni la première, bien sûr, ni la dernière.

Notons qu'aujourd'hui le Monde du vivant n'est déjà plus une organisation en écosystèmes phanérozoïques couvrant quasiment l'ensemble de la surface de la planète. Tout d'abord sa nouvelle composante, l'humanité, se situe désormais hors de ces écosystèmes, bien qu'elle en soit pleinement dépendante. Ensuite, des animaux et des végétaux ont été sortis de ces écosystèmes pour être domestiqués et soumis à l'humanité. Enfin, ces écosystèmes sont repliés sur des territoires de plus en plus étroits (en raison de l'expansion des zones urbaines, des terres agricoles, de la sylviculture intensive...). Par ailleurs, ils sont soumis à des contraintes inédites : extinction de plus en plus massive d'espèces, multiplication des espèces invasives, pollutions diverses...

3. Les premiers milles ans

Il y a onze milles ans, s'ouvrait le néolithique. L'agriculture (culture et élevage) émergeait et à sa suite de premières villes apparurent. Puis, il y a sept ou huit milles ans, l'agriculture s'était diffusée dans une grande part de l'humanité. Une modification anthropique de chaque composante du système bio-Terre était amorçait. Ces modifications se sont poursuivies jusqu'à nos jours où elles s'accélérent de façon exponentielle. Nous venons de le voir pour **le vivant**, celui-ci est désormais clairement sorti de l'éon Phanérozoïque. Quant aux **sols continentaux**, ils ont subi les déforestations, l'agriculture, l'urbanisation, les pollutions... **L'atmosphère** présente une modification de sa composition (dioxyde de carbone, méthane, ozone, microparticules, aérosols...). **Les océans** sont soumis à de fortes perturbations : acidification, *zones mortes*, pollutions diverses... Enfin, **le climat** amorce un réchauffement global particulièrement rapide. Le tout interagit de plus en plus intensément, de plus en plus rapidement, et, à bien des égards, le changement est irréversible. Il y a sept ou huit mille ans, l'anthropisation du système bio-Terre a ouvert la bifurcation vers l'éon Anthropozoïque.

4. La nouvelle composante du vivant

L'éon Anthropozoïque, à l'instar des éons qui l'ont précédé, est caractérisé par une nouvelle composante du vivant qui se différencie nettement de l'ensemble du vivant préexistant, et dont

le développement s'accompagne d'une transformation irréversible du Monde du vivant et de l'ensemble du système bio-Terre. Cette nouvelle composante est le genre Homo. Ses plus anciennes traces, aujourd'hui connues, datent d'environ 2,8 millions d'années (Willmoare et al., 2015). Toutes les espèces qui ont composé ce genre se sont éteintes, à l'exception d'Homo-sapiens. Il faut ici préciser en quoi cet acteur est aujourd'hui singulier et différent des autres espèces vivantes.

Tout d'abord, il y a sa puissance cognitive, mnésique et linguistique. Nous savons aujourd'hui, grâce aux travaux des éthologues, que les capacités cognitives, la mémoire et le langage ne sont nullement le propre d'Homo-sapiens. En revanche, ces aptitudes sont développées chez les humains à un niveau qui marque une profonde rupture avec toutes les autres espèces animales existante ; d'autant qu'elle sont notablement amplifiées par des techniques et des outils créés par Homo-sapiens : l'écriture bien sûr, puis le livre, l'imprimerie... et aujourd'hui l'ordinateur, les logiciels informatiques, Internet...

Si bien que, désormais, la grande part des être humains sont – potentiellement - capables de se représenter l'ensemble des humains, d'avoir conscience des périls qu'ils ont à affronter en commun et de se mobiliser derrière des objectifs d'échelle planétaire. Ensuite, Homo-sapiens est la première espèce vivante ayant acquis certains caractères d'une société planétaire. En particulier, aucune autre espèce n'a développé, en son sein et à l'échelle globale, un mode et un niveau de communication, d'influence et d'interaction qui soient similaires à ceux des humains.

Il faut enfin insister sur la capacité d'adaptation de l'humanité et sa dynamique d'évolution et d'accumulation, assimilation, destruction (matérielles et immatérielles) ou encore sa créativité. C'est inédit, sans aucune commune mesure avec toute autre espèce vivante. Enfin, en termes de puissance d'action sur le système bio-Terre, Homo-sapiens est vraisemblablement aujourd'hui au niveau des écosystèmes phanérozoïques lors de l'entrée dans l'éon du même nom, c'est-à-dire au niveau d'un nouveau type de vivant qui provoque un changement d'éon.

5. Fulgurance

L'apparition des premiers animaux furent les prémices de l'éon Phanérozoïque. C'était Il y a 580 millions d'années. Cette apparition précéda de 39 millions d'années l'explosion cambrienne, c'est-à-dire l'entrée effective du système bio-Terre en bifurcation vers le Phanéro-

zoïque. Cette fois-ci, les premiers Homo, prémices de l'éon Anthropozoïque, ont précédé la bifurcation vers celui-ci de moins de 3 millions d'années. Nous pouvons ainsi constater une réduction des temps de 39 millions à moins de 3 millions d'années entre les prémices et les débuts effectifs de ces deux bifurcations. Cependant, cela ne donne pas toute la mesure de l'accélération que connaît aujourd'hui l'histoire du système bio-Terre. Portons notre regard sur la durée des bifurcations. Nous avons vu que celle qui a ouvert le Phanérozoïque s'était déroulée sur 182 millions d'années. Qu'en sera-t-il cette fois-ci ? La bifurcation entre les éons Phanérozoïque et Anthropozoïque débuta avec la diffusion des sociétés pratiquant l'agriculture, devenues prépondérantes il y a sept ou huit milles ans. Puis la révolution industrielle a ouvert une série d'accélé-rations, il y a deux siècles. Enfin, depuis le milieu du XXe siècle les changements sont fulgu-rants. L'histoire du système bio-Terre se précipite et se traduit par une réduction extrême des temps géologiques.

3^e partie L'humanité

Libérer la complexité

Homo-sapiens est apparu dans le contexte du Quaternaire, il y a au moins 315 milles ans (Richter et al., 2017). Aujourd'hui, une bifurcation du système bio-Terre, qu'il a lui-même engendrée, le sort de ce contexte. Que sera son devenir ? Cette bifurcation pourrait s'emballer et finalement occasionner la disparition d'une grande part de l'humanité et le repli des survivants dans les zones restées habitables. Un autre scénario pourrait être le refuge de l'humanité sous des abris hermétiques géants, en raison d'un environnement où les êtres humains ne pourraient survivre. Bien d'autres scénarios où l'humanité survivrait peuvent être envisagés. La disparition de tout être humain de la surface terrestre ne serait pas à exclure⁴⁶², bien qu'elle semble extrêmement peu probable à court et moyen termes.

Dans le même temps, l'humanité, c'est à dire l'espèce humaine comprise comme l'ensemble organisé de ses membres, est d'une complexité extrême. Cette complexité, féconde en émergences inédites et en changements profonds, est sans commune mesure avec la complexité de toute autre espèce animale, de toute autre espèce vivante. Au cours du XX^e siècle, l'humanité a amorcé une bifurcation ou métamorphose (terme que, au sujet de l'humanité, nous privilégierons à celui de bifurcation, concept général et abstrait issu de la théorie de la complexité). Cette métamorphose s'accélère en ce début de XXI^e siècle. La suite est largement imprévisible. Tout peut aller très vite. Et nous ne pouvons exclure l'hypothèse selon laquelle l'humanité parviendrait à réorienter la suite de cette profonde transformation d'elle même (sans dérive transhumaniste) pour finalement agir avec lucidité, humilité et efficacité sur le système bio-Terre.

I. Obscurantisme scientifique et dé-complexification

Une hyper-complexité est présente et déterminante en chaque individu, au niveau des groupes sociaux, à l'échelle de l'humanité ou encore au plan du système bio-Terre. Dans le même temps,

⁴⁶² Voir à ce sujet l'annexe sur les champignons.

cette hyper-complexité, qui échappe largement aux approches quantifiées, est absente de nombreuses études dont la prétention scientifique se double d'une quantophrénie qui tend à ne prendre en considération que les aspects quantifiables du réel. Il s'en suit un aveuglement, une perte de lucidité qui m'amènent à parler d'obscurantisme scientifique. Ce dernier se déploie dans toutes les directions, pose son voile sur les esprits, exerce une emprise de plus en plus considérable sur l'humanité. Si bien que de nombreux acteurs, dont l'ambition – feinte ou authentique – est d'éclairer le réel, voire de guider ou de sauver l'humanité, contribuent à une mise en danger collective. En effet, ils laissent dans l'ombre tout ou partie de l'hyper-complexité de l'humanité et du système bio-Terre et excluent de leur approche des imprévisibles, des émergences et des bifurcations ou métamorphoses pouvant potentiellement avoir un impact déterminant sur notre futur. Une illustration particulièrement frappante nous en est donnée par des promoteurs de la géo-ingénierie qui, partant du constat que le dos au mur l'humanité se doit d'agir sur le devenir du climat, visent une modification de la composition chimique de l'atmosphère ou des océans à coups de diffusions massives de produits chimiques ; ce point est développé dans le sous-chapitre 3.3 de la partie I de notre thèse.

Jacques Grinevald, qui enseigne l'écologie globale à l'Institut d'études des relations internationales et du développement de Genève, met l'accent sur un aspect conséquent de l'obscurantisme scientifique, à savoir une frontière établie entre les sciences au service de la technique, d'un côté, et, de l'autre, les sciences du Monde du vivant. En voici une expression, reproduite dans Lorius et Carpentier (2010, p.94-95) : « *La technique moderne est basée fondamentalement sur une science préindustrielle : la mécanique. Or celle-ci exclut le vivant. On a fabriqué des écoles d'ingénieurs – selon une tradition militaire – où on enseignait les maths, la physique, un peu de chimie, ensuite l'électricité, l'électronique, etc. La modernisation occidentale a fabriqué un univers mécanique oubliant seulement que nous étions des êtres vivants dans une nature vivante. La société industrielle a des fondements scientifiques incomplets et anachroniques. Le XIXe siècle fut une erreur ; le XXe siècle, une catastrophe, et le XXIe ? On verra...* ».

Un autre aspect de l'obscurantisme scientifique est la quantification aberrante de domaines qui ne sont pas quantifiables. Les savoirs, les rapports sociaux et les activités humaines en sont affectés (Bocquet et al., 2018). Ainsi, une quantification du travail (sous la forme d'objectifs et d'évaluations chiffrés) participe à une déshumanisation et une perte de valeur et de sens de ce

dernier. Cette quantification sert une implication intégrale dans le travail, une soumission de la personne physique, mentale et morale du travailleur, dans le cadre d'une large autonomie accordée pour atteindre des objectifs chiffrés (Supiot, 2015).

Lever le voile obscurantiste et laisser libre cours à la complexité humaine est une des clés pour relever les défis de la complexité de la bifurcation du système bio-Terre. Toute diffusion auprès des populations humaines de la conscience de la complexité de cette bifurcation, de son imprévisibilité, de son irréversibilité et des menaces qu'elle présente pour l'humanité, sans dans le même temps diffuser une représentation de l'humanité qui prend en compte la complexité de cette dernière, son imprévisibilité et sa puissante capacité de changement et de métamorphose, serait une démarche périlleuse, susceptible de précipiter l'humanité dans l'angoisse et finalement dans une paralysie menant à l'effondrement et au chaos.

II. XXe siècle, l'humanité a amorcé une métamorphose

Depuis son apparition, Homo-sapiens évolue sans cesse, culturellement, socialement et physiologiquement. Durant le XXe siècle, cette évolution a été particulièrement importante.

Grâce à la médecine et à une transformation des modes et conditions de vie, la mortalité infantile a fortement baissé. Plus généralement, la durée de vie s'est allongée. Quant aux douleurs physiques, elles se sont atténuées et ont perdu leur caractère de quasi-omniprésence. Il faut toutefois noter, sur chacun de ces points, de fortes inégalités entre les pays riches et dominants et le reste de l'humanité, ainsi que, au sein des pays, entre les catégories socio-professionnelles.

A l'opposé de ces progrès, auxquels s'ajoute notamment la progression de l'alphabétisation, il y a le traumatisme de la seconde guerre mondiale avec ses camps d'extermination et le largage d'une bombe atomique sur Hiroshima puis sur Nagasaki. Il y a, de plus, la brutalité et l'échec du soviétisme.

Il faut aussi noter :

- une augmentation fulgurante de la population humaine qui, située aux environs de 1,65 milliards en l'an 1900, est passée à 6 milliards en l'an 2000, puis 8 milliards en 2022 ;
- le passage d'une humanité essentiellement rurale et agricole à une humanité majoritairement urbaine et largement déconnectée de la nature ;

- le déploiement massif des transports (automobile, avion...);
- la quasi extinction des sociétés traditionnelles;
- le cinéma;
- la musique enregistrée, qui sort cet art porteur d'émotions, de sentiments... d'un accès essentiellement collectif, pour le faire entrer dans les lieux de vie familiale ou individuelle et le marchandiser : achat de supports (disques, cassette...) et de matériels plus ou moins onéreux selon la qualité (phonographes, matériel Hi-Fi...);
- une première révolution de la communication et de l'information (radio, télévision, téléphone);
- la photographie, qui, dans la mesure de l'accès effectif à celle-ci, modifie le rapport que chaque humain entretient avec sa propre histoire, avec lui-même, avec ses proches...;
- l'éclairage électrique, qui modifie la nature profonde de la nuit et impacte le sommeil;
- la machine à laver et l'ensemble des appareils électroménager, qui contribuent aux changements de la place de la femme dans la famille et dans la société;
- la pilule et - dans la plupart des pays du Nord, en Chine, Afrique du Sud, Australie, Tunisie... (données de 2020, et donc postérieures au XX^e siècle) - la légalisation et la médicalisation de l'Interruption volontaire de grossesse (IVG).

En outre, il y a eu le passage de l'idéal issu de l'antiquité (Grèce et Chine notamment) d'une vie qui soit bonne et vertueuse, à l'idéal de plaisir, de bonheur et de maximisation du potentiel individuel. Ce passage s'est plus ou moins profondément accompli, selon les nations et selon les groupes sociaux. Il n'est nulle part absolu, complet. Il est à associer à l'individualisme et à la société de consommation - source de quantités colossales de déchets polluants les terres, les mers et l'atmosphère - qui se sont développés dans les pays les plus riches, ainsi qu'au sein d'une classe minoritaire des pays à plus bas revenus. Il faut aussi considérer les transformations des structures sociales, économiques, politiques et géopolitiques, et le niveau de puissance acquis par les marchés mondiaux et les dirigeants des entreprises multinationales au détriment de la souveraineté politique et démocratique. Enfin, il y a la naissance d'institutions internationales⁴⁶³, de la Société des nations et l'Organisation internationale du travail (1919) au GIEC (1988) et l'Organisation mondiale du commerce (1995).

⁴⁶³ Précédées par la création de premières organisations internationales sectorielles telles que l'Organisation météorologique internationale (1873), l'Union générale des postes (1874) ou la Cour permanente d'arbitrage (1899).

La liste des changements n'est ici pas exhaustive. Il faut notamment y ajouter l'accélération et la fuite en avant des innovations technoscientifiques. Celles ci impactent les sociétés humaines dans leur fondement, leur organisation et leur devenir, contribuent à des transformations de la personne humaine, sont au cœur de la bifurcation du système bio-Terre. Cependant, elles se déploient sous l'emprise des marchés et des entreprises, quasiment constamment en dehors des débats et des choix collectifs et démocratiques, y compris dans les sociétés les plus démocratiques. Enfin, nous devons porter notre attention sur la réduction de la diversité des rapports au réel, des organisations sociales, des langues et des cultures... A ce sujet, citons l'Anthropologue Claude Lévi-Strauss : « ... j'ai souligné à plusieurs reprises que la fusion progressive de populations jusqu'alors séparées par la distance géographique et par des barrières linguistiques et culturelles marquait la fin d'un monde qui fut celui des hommes pendant des centaines de millénaires, un ou deux millions d'années peut-être, quand ils vivaient en groupes durablement séparés les uns des autres et qui évoluaient chacun de façon différentes, tant sur le plan biologique que sur le plan culturel. Les bouleversements déclenchés par la civilisation industrielle en expansion, la rapidité accrue des moyens de transport et de communication ont abattu ces barrières. » (Levi-Strauss, 1986, p.141).

Finalement, durant le XXe siècle, une profonde transformation sociétale et humaine a embrassé tout à fois les cultures, les régimes politiques, les rapports de domination et de soumission, les rapports de genre et la sexualité, les rapports au corps, à la vie et à la mort, au fait religieux, à l'espace (réduction des distances...), au temps, au passé et au futur (accroissement des distances temporelles consécutif à une accélération de l'histoire humaine, etc.), les rapports à la nuit et au jour, aux sciences et aux techniques, au système bio-Terre et à l'humanité prise dans son ensemble et dans sa diversité.

III. Accélération

En ce début du XXIe siècle, la métamorphose de l'humanité s'accélère. La seconde moitié du XXe siècle avait vu l'émergence des outils numériques. Depuis lors, ceux-ci sont de plus en plus puissants. Ils ont ouvert la voie à des modes inédits de connaissance (création, accès et diffusion, stockage et archivage...), de communication et de socialisation (y compris de socialisation faible ou évaporation sociale), d'influence, de domination et de totalitarisme ou au contraire

d'émancipation et de démocratie... ou encore de chaos. L'impact est de plus en plus considérable (Laplantine, 2012), que ce soit sur les individus, leurs rapports au temps, aux autres, sur les représentations et les savoirs, sur la vie intérieure et les conditions de la pensée... ou encore sur l'organisation du travail et plus largement sur l'ensemble des aspects de la vie en société. Ces outils numériques sont structurés en un réseau mondial de connexion et de communication entre tous les humains (qui n'est pas sans rencontrer de limites, d'obstacles et de manipulations). Ils contribuent aux transformations des représentations que les individus ont de l'ensemble de l'humanité, au renforcement du sentiment d'appartenance à cette humanité et de la capacité de celle-ci à se penser en tant qu'espèce et au développement de son potentiel à modifier collectivement sa relation avec le système bio-Terre. Aussi, le rôle des outils numériques est central dans l'émergence d'un espace public mondial, comme l'ont montré le mouvement *MeToo* contre les violences sexuelles faites aux femmes, puis le mouvement contre le racisme et les violences policières suite à la mort de George Floyd (États-Unis, 25 mai 2020). Le développement de cet espace public mondial est favorisé par la diffusion d'une langue commune, l'anglais international, et par l'amélioration des logiciels de traduction. Cependant, il rencontre des freins et des entraves comme les replis nationalistes, et des forces situées aux antipodes de l'émancipation s'exercent par un contrôle et des manipulations diverses de populations.

Les outils numériques interagissent avec d'autres révolutions technologiques, celles des nanotechnologies et des biotechnologies notamment, et se situent dans le contexte d'une prise de conscience – qui s'accélère depuis le milieu des années 2010 – de la bifurcation du système bio-Terre ; le tout avec en toile de fond le déclin de la domination de l'Occident, la puissance toujours plus grande de la Chine et aujourd'hui l'émergence d'une ligne de front entre d'un côté les régimes autoritaires (Chine, Russie...) et de l'autre les régimes où le pouvoir politique est issu de l'expression du suffrage universel (États-Unis, Union européenne...). S'y ajoute la menace post-humaniste de femmes et d'hommes augmentés (Testart et Rousseaux, 2018), êtres hybrides au croisement de l'humain et de la machine, connectés et intégrés à un système technique asservissant, dominés par les phantasmes de toute puissance de milliardaires tels que Larry Page, cofondateur de Google, et d'inventeurs tels que Ray Kurzweil. Ce dernier, idole des transhumanistes étasuniens et cofondateur en 2008 de l'Université de la singularité, est employé par la même entreprise Google depuis 2012. Google, au pouvoir financier considérable, accumule une quantité astronomique de données sur les populations du monde et se place

toujours plus en surplomb de l'humanité qu'elle ambitionne d'orienter, hors de tout contrôle démocratique.

Enfin, l'accélération de la métamorphose de l'humanité c'est aussi, ces toutes dernières années, la progression rapide au sein de la population mondiale de la conscience du changement climatique et plus largement de la conscience écologique ; s'y ajoute la pandémie mondiale COVID 19. Il en découle une situation d'activation du potentiel de chaque humain à se représenter l'ensemble des humains, à avoir conscience des périls à affronter en commun et à se mobiliser derrière des objectifs d'échelle planétaire. Une étape importante de la métamorphose de l'humanité peut sembler s'accomplir. Dès aujourd'hui une convergence – qui se double d'une confrontation géopolitique majeure – se développe entre les grandes puissances politiques (Union européenne, États-Unis, Chine...) autour d'accords internationaux et d'objectifs de moyen et de long termes qui exigent un véritable engagement et une transformation techno-sociale, cela afin d'apporter des réponses à des problèmes planétaires extrêmement complexes et porteurs de menaces majeures sur les décennies et siècles à venir. Un exemple emblématique, voire le plus emblématique, de cette convergence émergente se réalise autour d'objectifs de réduction des émissions de gaz à effet de serre et la neutralité carbone vers 2050, afin de maîtriser le changement climatique ; avec toutefois des incertitudes sur la réalisation effective et sur la hauteur suffisante de ces objectifs, et des interrogations sur la nature et la qualité, voire les travers et les dangers des chemins suivis pour y parvenir ou s'en approcher. Cette convergence était imprévisible il y a vingt ans, voire impensable.

Finalement, la métamorphose du système hyper complexe que constitue l'humanité est un lieu d'émergences et un lieu de confrontation de forces et de mouvements contradictoires. Son devenir est largement imprévisible. Si bien que personne n'est en capacité de savoir ce que deviendra l'humanité. Tout ira très vite. Dans cinquante ans, des voies inimaginées aujourd'hui auront été empruntées.

IV. Utopie

Toute métamorphose de l'humanité, toute révolution anthropologique est indissociable d'une transformation des individus, femmes et hommes. Chaque être humain est complexe. Chaque

être humain est susceptible de suivre des bifurcations majeures, dès lors que le contexte dans lequel il se situe et que les contraintes qui s'exercent sur lui se modifient.

Ces dernières décennies, la bifurcation du système bio-Terre provoquée par l'humanité s'accélère dangereusement et change profondément le contexte de vie de tout être humain. Une mobilisation générale, planétaire et durable est indispensable. Son caractère d'urgence s'accroît. Nous entrons dans une période historique où un engagement individuel et collectif porteur de sens se présente à l'ensemble des humains. Il s'agit de relever les défis planétaires et, pour ce faire, d'opérer une transformation de l'humanité et de son rapport au système bio-Terre. Les relations et les modes d'organisation au sein de l'humanité, les activités, les modes de vie et de pensée... tout doit être refondé afin de construire une *civilisation écologique*⁴⁶⁴. Chaque être humain est appelé à s'engager, à contribuer à l'histoire collective de l'humanité, pour que la métamorphose amorcée au XXe siècle débouche sur un nouveau groupe d'appartenance, global, planétaire, s'ajoutant aux groupes d'appartenance préexistants : familles, réseaux divers, nations... Un groupe uni, organisé et conscient de lui-même, de sa puissance et de sa fragilité, mobilisé pour la pérennité d'un système bio-Terre hospitalier, mobilisé pour le bien vivre et l'épanouissement durables de chacune de ses populations. Finalement, il s'agit d'ériger l'Humanité. Tout à la fois dans l'urgence du présent et pour le très long terme, comme nous y invite la notion d'éon Anthropozoïque. A l'opposé de nos sociétés de l'immédiateté, de l'individualisme et de la perte de sens, s'esquisse ainsi l'utopie de l'*anthropozoïsme* inscrite dans la complexité et le temps long de l'aventure du vivant, c'est-à-dire une nouvelle perspective humaniste.

464 Concept inscrit depuis 2018 dans la Constitution de la République populaire de Chine.

Bibliographie

Berner Rober A. (2003). *The long-term carbon cycle, fossil fuels and atmospheric composition*. Nature. Numéro 426. 20 novembre 2003.

Bocquet Bertrand (sous la direction de). (2018). *La fièvre de l'évaluation. Quels symptômes ? Quels traitements ?* Presses universitaires du Septentrion. Villeneuve d'Ascq.

Braconnot Pascale, Cassou Christophe, Planton Serge, Swingedouw Didier, Terray Laurent, Voldoire Aurore (Comité de rédaction). (2020). *Climat, modéliser pour comprendre et anticiper*. Réaliser dans le cadre du projet MISSTERRE qui rassemble les les laboratoires français de modélisation climatique (CNRM, Centre de recherche de Météo-France, Cerfacs et IPSL). https://www.ipsl.fr/wp-content/uploads/2020/07/plaquette_MISSTERRE.pdf

Cailloce L.. (2015). *Pergélisol, le piège climatique*. Interview de Florent Dominé. Journal du CNRS. Janvier 2015.

Delaygue Gilles. (2001). *Influence des variations d'insolation sur le climat global : modèles climatiques*. Université de Chicago, Département de Géosciences. Mai 2001. <http://planet-terre.ens-lyon.fr/article/variations-insolation.xml>

Dutrieul Sébastien. (2016). *Gaïa : hypothèse, programme de recherche pour le système terre, ou philosophie de la nature ?* Thèse de doctorat. Université Paris 1 Panthéon-Sorbonne. École doctorale de philosophie. 2 décembre 2016.

Farquharson L. M., Romanovsky V. E., Cable W. L., Walker D. A., Kokelj S. V., Nicolsky D. (2019). *Climate Change Drives Widespread and Rapid Thermokarst Development in Very Cold Permafrost in the Canadian High Arctic*. Geophysical Research Letters. 10 juin 2019.

Garcia Jean-Louis. (1998). *Les bactéries méthanogènes Methanogenic archaea*. Mai 1998. https://horizon.documentation.ird.fr/exl-doc/pleins_textes/pleins_textes_7/b_fdi_51-52/010019338.pdf

François Laplantine. (2012). *Anthropologie et numérique Questions épistémologiques et éthiques*. Journal des anthropologues 128 – 129 / 2012, p. 301-323.

<https://journals.openedition.org/jda/5955>

Lévi-Strauss Claude. (1986). *L'Anthropologie face aux problèmes du monde moderne. Trois conférences prononcées à Tokyo en 1986*. Éditions du Seuil. Paris. Avril 2011.

Lorius Claude et Carpentier Laurent. (2010). *Voyage dans l'Anthropocène*. Éditions Actes Sud.

Lovelock James. (1979). *La Terre est un être vivant, L'hypothèse Gaïa*. Éditions Flammarion. Paris. 1993. Édition initiale en 1979.

Magnan Alexandre. (2013). *Changement climatique : tous vulnérables ?* Edition Rue d'Hulm. Paris.

Mahé Stéphane. (2012). *Diversité des branches évolutives basales du règne des champignons dans les écosystèmes hydrothermaux marins profonds*. Thèse. Université de Rennes1. Mai 2012. <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-00797898/document>

Masson-Delmotte Valérie. (2011). *Climat : le vrai et le faux*. Paris : Le Pommier.

Mondon Sylvain. (2017). *Défis environnementaux émergents*. APORS Edition / « Prospectives et stratégies » 2017/1 Numéro 8. ISSN 2260-0299. ISBN 9782954226309. <https://www.cairn.info/revue-prospective-et-strategie-2017-1-page-27.htm>

Morin Edgar. (2001). *L'humanité de l'humanité. L'identité humaine. Tome 5 de La méthode*. Éditions du Seuil. Paris. Novembre 2001.

Richter Daniel, Grün Rainer, Joannes-Boyau Renaud, Steele Teresa E., Amani Fethi, Rué Mathieu, Fernandes Paul, Raynal Jean-Paul, Geraads Denis, Ben-Ncer Abdelouahed, Hublin Jean-Jacques et McPherron Shannon P. (2017). *The age of the hominin fossils from Jebel Irhoud, Morocco, and the origins of the Middle Stone Age*. Nature, numéro 546. 8 juin 2017.

Shakhova N., Semiletov I., Salyuk A., Yusupov V., Kosmach D. & Gustafsson Ô. (2010) . *Extensive Methane Venting to the Atmosphere from Sediments of the East Siberian Arctic Shelf*. Science. N° 327. Mars 2010.

Supiot Alain. (2015). *La gouvernance par les nombres. Cours au Collège de France (2012 - 2014)*. Editions Fayard. Paris. Juin 2015.

Testart Jacques, Rousseaux Agnès. (2018). *Au péril de l'humain. Les promesses suicidaires des transhumanistes*. Seuil. Paris. Mars 2018.

Vernadsky Vladimir . (1924). *La Géochimie*. Librairie Félix Alcan, Paris, 1924.

Villmoare Brian, Kimbel William H., Seyoum Chalachew, Campisano Christopher J., DiMaggio Erin N., Rowan John, Braun David R., Arrowsmith J Ramón , Reed Kaye E. (2015). *Early Homo at 2.8 Ma from Ledi-Geraru, Afar, Ethiopia*. Science. Vol. 347. 20 mars 2015.

Woese Carl R. et Fox George E. (1977). *Phylogenetic structure of the prokaryotic domain: The primary kingdoms*. PNAS. Août 1977. <http://www.pnas.org/content/74/11/5088>

Annexe 2 : Réactivité du méthane et Inertie du dioxyde de carbone

Éclairage sur l'opportunité qu'offre une réduction des émissions de méthane

Nous allons considérer deux GES. L'un dont la courte durée de vie se traduit par une captation annuelle par les puits de 10 % de son stock dans l'atmosphère (c'est approximativement le cas du méthane). L'autre dont la durée de vie bien plus longue se traduit par une captation annuelle par les puits de 1 % de son stock dans l'atmosphère (c'est approximativement le cas du dioxyde de carbone). Supposons que l'un et l'autre connaissent une augmentation de leur taux de concentration dans l'atmosphère de 0,5 % depuis dix ans (C'est très approximativement le cas actuellement pour le CH₄ et pour le CO₂). Supposons pour finir que l'un et l'autre connaissent durant une année une baisse de 20 % de leurs émissions.

Pour le premier, les émissions étaient, avant cette baisse, égales à 10 % du stock (pour compenser la captation par les puits) + 0,5 % du stock (pour obtenir l'augmentation). Au total, les émissions étaient de 10,5 % du stock. Donc, durant l'année de baisse des émissions, cette baisse sera de 2,1 % du stock (20% des 10,5 %), c'est à dire que les émissions seront égales à 8,4 % du stock (10,5 % – 2,1 %). Or durant la même année ce GES voit 10 % de son stock capté par les puits, si bien qu'au terme de l'année le stock et donc la concentration de ce GES auront baissé de 1,6 %.

Nous allons maintenant voir que le résultat sera nettement moins bon pour le second GES. Reprenons le même calcul. Pour le second GES, les émissions étaient, avant cette baisse, égales à 1 % du stock (pour compenser la captation par les puits) + 0,5 % du stock (pour obtenir l'augmentation). Au total, les émissions étaient de 1,5 % du stock. Donc, durant l'année de baisse des émissions, cette baisse sera de 0,3 % du stock (20% des 1,5 %), c'est à dire que les émissions seront égales à 1,2 % du stock (1,5 – 0,3). Or durant la même année ce GES voit 1 % de son stock capté par les puits, si bien qu'au terme de l'année ce stock aura augmenté de 0,2 %.

En conclusion, le premier GES voit son stock se réduire de 1,6 %, alors que le second voit le sien poursuivre une augmentation, de 0,2 %. Ces calculs montrent que prioriser une baisse des émissions de méthane serait une orientation pertinente dans une situation de nécessité de baisse rapide de l'effet de serre globale.

Dioxyde de carbone : à propos du « bond » de 2020

Durant la décennie 2010-2019, les émissions anthropiques de CO₂ d'origine fossile ont été en moyenne de l'ordre de 9,8 GtC. En 2019 de l'ordre de 10,1 GtC. Puis en 2020, en conséquence des politiques menées face à la pandémie Covid 19, ces émissions anthropiques ont connu une baisse d'environ 7 %. (Ces différentes données sont issues du 6^e RE, GT1⁴⁶⁵). Si bien que la baisse des émissions anthropiques de dioxyde de carbone s'est élevée à environ 0,7 GtC. Or, dans l'atmosphère 1ppm vaut 2,13 GtC⁴⁶⁶. Donc en 2020 la baisse des émissions de CO₂ a été de l'ordre de 0,33ppm.

Par ailleurs, durant la décennie 2010-2019, en moyenne le taux de CO₂ dans l'atmosphère augmentait approximativement de 2,39ppm⁴⁶⁷ avec, selon ce que nous avons vu ci-avant, une augmentation en 2019 à 2,53ppm (+0,3GtC, soit +0,14ppm). Par conséquent, en 2020, nous aurions pu anticiper une hausse de (2,53 – 0,33)ppm, soit une hausse de l'ordre de 2,2ppm. Finalement, selon l'article de la NOAA, *Malgré les arrêts d'activité pour cause de pandémie, le dioxyde de carbone et le méthane ont fait un bond en 2020*, cité dans la sous-section III.2.1.5.1 de notre thèse qui a motivé la rédaction de cette annexe, la hausse effective de 2020 a été de 2,6ppm, soit légèrement supérieure à celle de 2019 ; cela bien que le premier semestre 2019 connaissait la

465 Version du rapport intégral adoptée et diffusée sous une édition provisoire datée du 7 août 2021, section 5.2.1.1, page 1171 et 1172.

466 Confer <http://www.gblanc.fr/spip.php?article731>, où le physicien Guillaume Blanc calcule ce chiffre en partant uniquement de grandeurs et de taux établis scientifiquement et communément connus (du moins dans la communauté des climatologues et des spécialistes de l'atmosphère terrestre).

467 6^e RE, GT1, Version intégrale diffusée sous une édition provisoire, page 1174.

fin d'un épisode El Niño, qui occasionne une augmentation du taux de CO₂ (Feely *et al.*, 1999 ; Betts *et al.*, 2016), dont l'année 2020 ne verra pas d'occurrence⁴⁶⁸.

La conclusion de notre développement est que la baisse des émissions mondiales, due à la pandémie ne pouvait modifier de façon importante le niveau de la hausse annuelle du taux de dioxyde de carbone dans l'atmosphère, d'une part, mais que, d'autre part, elle aurait *a priori* dû s'accompagner d'une légère baisse de la hausse annuelle de ce taux de concentration, laquelle baisse n'a pas eu lieu ; ce qui peut apporter une certaine justification au titre de l'article de la NOAA, '*Malgré les arrêts d'activité pour cause de pandémie, le dioxyde de carbone et le méthane ont fait un bond en 2020*'

468 Voir le blog étasunien de climatologues, NOAA Climate.gov,

<https://www.climate.gov/news-features/blogs/enso> , où est effectué un suivi d'ENSO, phénomène sous-jacent de l'alternance des épisodes El Niño et La Niña.

Annexe 3 : Les scénarios du 6^e RE du GIEC

Tableau RID.1⁴⁶⁹-6^e RE. Les hausses de température par rapport à la période de référence 1850-1900, exprimée en °C, selon les 5 scénarios du rapport.

Scénario	Court terme, 2021–2040		Moyen terme, 2041–2060		Long terme, 2081–2100	
	Meilleure estimation	Très probable	Meilleure estimation	Très probable	Meilleure estimation	Très probable
SSP 1-1.9	1,5	1,2 à 1,7	1,6	1,2 à 2,0	1,4	1,0 à 1,8
SSP 1-2.6	1,5	1,2 à 1,8	1,7	1,3 à 2,2	1,8	1,3 à 2,4
SSP 2-4.5	1,5	1,2 à 1,8	2,0	1,6 à 2,5	2,7	2,1 à 3,5
SSP3-7.0	1,5	1,2 à 1,8	2,1	1,7 à 2,6	3,6	2,8 à 4,6
SSP5-8.5	1,6	1,3 à 1,9	2,4	1,9 à 3,0	4,4	3,3 à 5,7

Ces scénarios du 6^e RE ont en commun avec ceux du 5^e RE une classification en fonction de l'augmentation du forçage radiatif total en l'an 2100 par rapport à la période pré-industrielle. Dans le 6^e RE, la classification est la suivante : 1,9 W/m², 2,6 W/m², 4,5 W/m², 7,0 W/m² et 8,5 W/m². Dans le 5^e RE, elle était : 2,6 W/m², 4,5 W/m², 6,0 W/m² et 8,5 W/m². Nous notons que par rapport au 5^e RE, dans le 6^e RE l'ambition du scénario le plus exigeant est renforcée, dans la continuité du rapport spécial 1,5°C publié en 2018.

⁴⁶⁹ Page 14 de la version en anglais.

Annexe 4 : Champignons, l'effet boomerang

Des champignons sont en association symbiotique avec des plantes, sans laquelle ni l'un ni l'autre ne peuvent survivre. Par ailleurs, les champignons sont au cœur de la dégradation des résidus végétaux. Ils jouent un rôle majeur dans les écosystèmes. Dans le même temps, des champignons sont responsables de maladies qui peuvent être particulièrement redoutables. Ainsi, au XXe siècle en Europe, le champignon microscopique *Ophiostoma ulmi* (*sensu lato*) a occasionné la quasi disparition des ormes. En ce début de XXIe siècle, toujours en Europe, depuis 2008 le *Chalara fraxinea*, champignon microscopique d'Asie introduit par négligence humaine, se propage et décime la population des frênes. Les maladies dues à la propagation de champignons peuvent déboucher sur la disparition d'espèces végétales ou animales avec une probabilité bien plus importante que ce n'est le cas pour les maladies dues à des virus ou des bactéries. De plus, concevoir des remèdes sans endommager les cellules de leurs victimes, plantes ou animaux, peut parfois être particulièrement difficile, en raison de l'appartenance des champignons à l'univers des eucaryotes, et donc de la proximité de leurs cellules avec celles des plantes et des animaux.

Or l'humanité modifie les conditions de vie du règne des champignons, ce qui entraîne une évolution de ce dernier et une augmentation de son impact en termes de maladies infectieuses et d'érosion de la biodiversité. Cette situation est résumée dans un article de la revue Nature du 12 avril 2012 : « *Au cours des deux dernières décennies, on a observé une augmentation du nombre de maladies infectieuses virulentes. Tant chez les animaux que chez les plantes, un nombre sans précédent de maladies fongiques ont récemment causé certaines des mortalités et extinctions les plus graves jamais observées chez les espèces sauvages, et mettent en péril la sécurité alimentaire. L'activité humaine intensifie la dispersion des maladies fongiques en modifiant les milieux naturels et en créant ainsi de nouvelles possibilités d'évolution. Nous soutenons que les infections fongiques naissantes entraîneront une érosion croissante de la biodiversité, avec des implications plus larges pour la santé humaine et des écosystèmes, à moins que des mesures ne soient prises pour renforcer la biosécurité dans le monde entier.* » (Fisher et al., 2012). Cet article relate en outre une accentuation des émissions de dioxyde de carbone des

plantes victimes de maladies fongiques. Il est complété par une publication de la revue Science (Fisher et al., 2018), où cette dernière alerte sur les menaces pour la santé humaine et la sécurité alimentaire présentées par l'émergence à l'échelle mondiale de résistances aux substances antifongiques. La première cause est un usage massif de fongicides par les agriculteurs. Il en résulte un redoutable effet boomerang, une résistance à ces fongicides de champignons pathogènes pour des cultures, mais aussi une résistance de champignons qui sont pathogènes pour les humains. Ceci n'est pas sans rappeler certaines bactéries pathogènes pour les humains, devenues résistantes aux antibiotiques.

Finalement, le règne des champignons, soumis à un environnement en évolution rapide, est lui même en évolution rapide. Vu la dangerosité des champignons pathogènes, tant pour les plantes que les animaux, y compris les êtres humains, l'humanité a ici un défi crucial à relever. Un défi d'autant plus difficile que l'évolution à venir des champignons pathogènes est largement imprévisible. Le règne des champignons reste peu connu : la recherche qui lui est destinée a longtemps été marginale ; elle reste encore aujourd'hui trop peu soutenue.

Bibliographie

Fisher Matthew C., Henk Daniel A., Briggs Cherie J., Brownstein John S., Madoff Lawrence C., McCraw Sarah L., Gurr Sarah J. (2012). *Emerging fungal threats to animal, plant and ecosystem health*. *Nature*. 2012 Apr 11;484(7393):186-94. doi: 10.1038/nature10947. PMID: 22498624; PMCID: PMC3821985.

Fisher Matthew C., Hawkins Nichola J., Sanglard Dominique, Gurr Sarah J. (2018). *Worldwide emergence of resistance to antifungal drugs challenges human health and food security*. Publié par la revue Science. 18 mai 2018. Vol. 360, pp. 739-742.

Annexe 5 : GIEC, un engagement de la France

Le gouvernement français était particulièrement engagé dans la promotion internationale du *facteur 2*, cela dès février 2003 avec l'intervention du Premier ministre devant l'Assemblée plénière du GIEC, c'est-à-dire devant l'ensemble des représentants des gouvernements des nations. Or, cet objectif était alors plus ambitieux que chacun des scénarios publiés par le GIEC. Ce n'est qu'en juin 2007 que, avec la publication de la contribution du GT1 au 4^e RE, des scénarios présentés par le GIEC dépassèrent l'objectif du *facteur 2*. Ainsi, la France a ici joué un rôle moteur dans le renforcement du consensus international.

En 2018 la France a fourni plus 50 % des recettes du GIEC⁴⁷⁰, notamment afin de palier à l'absence de financement par les États-Unis en 2017, puis à la quasi absence en 2018.

Sur proposition du gouvernement français, Valérie Masson-Delmotte a été co-présidente du GT1 du GIEC durant le cycle du 6^e RE, cycle qui a vu le GT1 jouer un rôle historique dans le renforcement majeur du consensus international à l'égard du réchauffement climatique.

470 <https://apps.ipcc.ch/eventmanager/documents/75/260720220715-Doc.%20%20-%20%20IPCC%20Programme%20and%20Budget.pdf>

Annexe 6 : les sigles

ADEME : Agence de l'environnement et de la maîtrise de l'énergie

AMIP : Atmosphérique Model Intercomparison Project

AMOC : Atlantic Meridional Overturning Circulation, en français Circulation méridienne océanique de retournement de l'Atlantique

CCNUCC : Convention cadre des Nations Unies sur les changements climatiques

CDR : Carbon Dioxide Removal

CEA : Commissariat à l'énergie atomique et aux énergies alternatives

CIS : Conseil international des sciences (voir ISC)

CNRS : Centre national de la recherche scientifique

CMIP : Coupled Model Intercomparison Project

CO : Carbone organique

COP : Conference of parties (conférence des États signataires)

EMM : Ensembles multi-modèles

ENSO : El Niño-Southern Oscillation

ES : Executive Summary

FAO : Food and Agriculture Organization (Organisation des Nations Unies pour l'agriculture et l'alimentation)

GARP : Global Atmospheric research programme

GES : Gaz à effet de serre

GIEC : Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat

GT : Groupe de travail du GIEC.

GtC : Gigatonne de carbone, 10^9 tonnes de carbone

ICSU : International Council of Scientific Unions

IPSL : Institut Pierre-Simon Laplace

ISC : International Science Council (voir CIS)

MCG : Modèle de circulation générale

MIES : Mission interministérielle de l'effet de serre

MOC : Meridional Overturning Circulation, en français Circulation méridienne océanique de retournement, encore appelée circulation thermohaline

NOAA : National Oceanic and Atmospheric Administration

OMM : Organisation météorologique mondiale

OMS : Organisation mondiale de la santé

Pg : Pétagramme, 10^{15} g

PMRC : Programme mondial de recherche sur le climat

PNUE : Programme des Nations Unies pour l'environnement

ppb : parties par billion (milliard)

ppm : parties par million

RCP : Representative Concentration Pathways, en français Profils représentatifs d'évolution de concentration des GES.

RE : Rapport d'évaluation

RID : Résumé à l'intention des décideurs

RSSE : Rapport spécial sur les scénarios d'émission (SRES en anglais)

RT : Résumé technique

SHS : Sciences humaines et sociales

SN : Sciences naturelles

SRM : Solar Radiation Management

SRES : Special Report on Emissions Scenarios (RSSE en français)

STS : Science and Technology Studies

Tg : Téra-gramme, 10^{12} g

UNESCO : United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization (Organisation des Nations Unies pour l'éducation, la science et la culture).

VOA : Version originale en anglais.