HAL
open science

Comment tenir compte de l'irréversibilité dans l'évaluation intégrée du changement climatique ?

Minh Ha-Duong

To cite this version:

Minh Ha-Duong. Comment tenir compte de l'irréversibilité dans l'évaluation intégrée du changement climatique ?. Economies et finances. Ecole des Hautes Etudes en Sciences Sociales (EHESS), 1998. Français. NNT : . tel-00003505

HAL Id: tel-00003505

https://theses.hal.science/tel-00003505v1

Submitted on 8 Oct 2003

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.

EHESS - École des Hautes Études en Sciences Sociales

Comment tenir compte de l'irréversibilité dans l'évaluation intégrée du changement climatique ?

THÈSE

pour obtenir le grade de

Docteur de l'École des Hautes Études en Sciences Sociales

Spécialité : Analyse et Politique Économiques

Présentée et soutenue publiquement le

3 avril 1998

par

HA DUONG Minh

Directeur de thèse: Jean-Charles Hourcade

JURY

Gabrielle Demange, Directrice d'Études à l'EHESS.

Claude Henry (rapporteur), Professeur à l'Ecole Polytechnique.

Jean-Charles Hourcade, Directeur de Recherche au CNRS.

Alan S. Manne, Professeur Émérite à l'Université de Stanford.

Pierre Picard (rapporteur), Professeur à l'Université de Paris X.

Ha-Duong, Minh

Comment tenir compte de l'irréversibilité dans l'évaluation intégrée du changement climatique ?

Thèse de doctorat de l'Ecole des Hautes Etudes en Sciences Sociales, 258 pages, 1998.

inclus : 68 figures, 35 tableaux, 16 encadrés, bibliographie 429 références, index.

accompagné d'un annexe : « *DIAM : a Model on the Dynamics of Inertia and Adaptability - Analyse et implémentation », 150 pages.*

.

Mots Clefs : Changement climatique, Irréversibilité, Coûts d'ajustement, Incertitude, Modèle.

JEL : D83, H41, Q28, Q48.

9 8 7 6 5 4 3

Copyright 1998 Ha Duong Minh

La reproduction et la modification des informations publiées dans cette thèse et ses annexes est autorisée,
sous les termes de la GNU General Public Licence version 2.

Remerciements

Je tiens en premier lieu à exprimer ma sincère gratitude à Jean-Charles Hourcade, pour sa direction bienveillante et éclairée de l'ensemble de mes recherches, et je le remercie pour sa patience, ses encouragements et les nombreux conseils qu'il m'a prodigués sans jamais compter son temps.

Une bonne partie des travaux décrits ici résulte d'un travail commun avec Michael J. Grubb, du Royal Institute of International Affairs à Londres, avec Thierry Chapuis, aujourd'hui chez Gaz de France et avec Pierre Matarasso du CIRED. Qu'ils sachent tous trois que j'ai énormément apprécié leur présence et souhaite de tout coeur poursuivre cette collaboration.

Si cette thèse est achevée aujourd'hui, c'est grâce à l'ambiance intellectuelle stimulante du CIRED. J'adresse un merci particulier à Emmanuel Fages et Franck Lecocq pour leurs commentaires et les relectures. Je ne saurai compter tout ce que je dois à mes parents, qui continuent aujourd'hui encore à favoriser mes études avec une générosité extraordinaire en gardant leurs petits enfants pour que je puisse écrire.

Ces travaux ont été financés pour les trois premières années par une Allocation de Thèse à l'*Ecole des Hautes Etudes en Sciences Sociales* et Monitorat d'Initiation à l'Enseignement Supérieur du *Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche* de la République Française à l'*Université de Paris VIII*. Le financement subséquent provient de la *Commission Européenne* sur le contrat INASUD.

Toutefois, les vues exprimées ici ne sauraient engager d'autre personne que moi même, de même que toutes les erreurs ou omissions qui pourraient subsister.

***

Sommaire

CHAPITRE 1. IRRÉVERSIBILITÉ ET ÉVALUATION DU CHANGEMENT CLIMATIQUE 7

CHAPITRE 2. LES CONDITIONS DU PROBLÈME DU CHANGEMENT CLIMATIQUE 37

CHAPITRE 3. DU CHANGEMENT CLIMATIQUE AU PROBLÈME DE DÉCISION 77

CHAPITRE 4. DES MODÈLES D'ÉVALUATION INTÉGRÉE 105

CHAPITRE 5. DIAM - MODÈLE DYNAMIQUE INERTIE-ADAPTABILITÉ 135

CHAPITRE 6. DÉCISION SÉQUENTIELLE ET TIMING DES RÉDUCTIONS 165

CHAPITRE 7. CHANGEMENT CLIMATIQUE ET VALEUR D'OPTION 193

CHAPITRE 8. CONCLUSION 221

BIBLIOGRAPHIE 227

TABLES ET INDEX 247

***

Chapitre 1. Irréversibilité et évaluation du changement climatique

1. Introduction générale

1.1. Position de ce travail

Cette thèse se situe dans le domaine de **l'évaluation intégrée du changement climatique**. D'après le Groupe d'experts Intergouvernemental sur l'Evolution du Climat (GIEC), l'évaluation intégrée consiste à *associer des connaissances provenant d'un grand nombre de disciplines pour donner des éclairages qu'il ne serait pas possible d'obtenir par la recherche disciplinaire traditionnelle* (GIEC 1995[1]). Quand au terme "changement climatique", nous allons en explorer le sens ci-après. La première section de cette introduction sera en effet consacrée à la terminologie. Nous examinerons donc ce qu'est le changement climatique, mais aussi ce que nous entendons par "tenir compte de l'irréversibilité", ainsi que quelques autres concepts qui se rapportent à notre sujet. Cette première clarification conceptuelle aboutira à poser la problématique, que nous récapitulerons dans une page à la fin de cette première section.

Nous expliquerons dans la seconde section de ce chapitre quelle est notre méthode et pourquoi elle nous a semblé fructueuse par rapport aux questions que nous nous sommes posées. Notre approche pourrait se caractériser par trois adjectifs: quantitative, agrégée et normative. Elle est quantitative puisque, après l'analyse conceptuelle, nous codons mathématiquement les aspects que nous voulons explorer et nous définissons un modèle numérique. Elle est agrégée, car nous considérons le monde et la société de tous les hommes dans son ensemble, sans distinction de régions; nous ne détaillons pas plus les techniques de production, ni les divers types de biens économiques, ni les divers gaz à effet de serre. L'approche est aussi normative car nous utilisons un modèle d'optimisation. Cela veut dire que étant donnés des objectifs de politique, nous recherchons quelle est la meilleure manière d'atteindre ces objectifs. En général, les modèles d'optimisation se distinguent des modèles d'évaluation, qui servent davantage à analyser les diverses conséquences de telle ou telle politique donnée.

En dernière section de ce chapitre, nous présenterons le plan détaillé de cette thèse. Des annexes à caractère plus technique rassemblent des démonstrations mathématiques et le code du modèle utilisé dans cette thèse, DIAM. On peut y trouver des résultats détaillés, des figures, et la définition complète des algorithmes de résolution utilisés.

1.2. Le problème du changement climatique

Parmi les divers facteurs qui régulent le climat terrestre, comme les paramètres astronomiques ou encore les populations des micro-organismes, la composition gazeuse de l'atmosphère joue un rôle crucial. Les concentrations des gaz appelés gaz à effet de serre (GES) sont particulièrement importantes. En anglais, ces gaz sont appelés désignés par l'acronyme GHG, 'GreenHouse Gases'. Le Tableau 1.1 montre les concentrations actuelles et passées de trois gaz à effet de serre parmi les plus importants.

Ces gaz affectent le bilan énergétique du système climatique, selon le mécanisme schématisé Figure 1.1, exprimé déjà en 1824 par Fourier[2] mais surtout connu depuis la fin du 19e siècle grâce à Arrhenius[3]. Comme le Tableau 1.2 le montre, l'effet de serre est très important dans la régulation du climat des planètes. La température moyenne actuelle à la surface de la Terre est de l'ordre de 15°C. Sans l'effet de serre, elle serait de l'ordre de -18°C: un climat glacial.

Mais comme on le voit sur le Tableau 1.1, la concentration en GES a augmenté durant ces deux

derniers siècles. Face à cette augmentation, le climat s'adapte pour maintenir l'équilibre énergétique. Un des changements probables (parmi d'autres), serait un réchauffement de la surface de la terre et de la basse atmosphère. On appelle ce phénomène le réchauffement global. La Figure 1.2 montre ce qui pourrait se passer si l'on ne fait rien pour réduire les émissions de gaz à effet de serre. Mais elle ne résume pas tout et, au delà d'une variation de la température moyenne globale, le changement climatique inclut aussi les fluctuations du niveau de la mer, de l'amplitude thermique diurne, des précipitations...

Le changement climatique n'est qu'une des composantes du changement globalchangement climatique:. Ce terme, depuis la conférence de Rio en 1992, inclut aussi la biodiversité et le trou dans la couche d'ozone. Le changement climatique représente toutefois, pour les écosystèmes et systèmes socio-économiques déjà affectés par la pollution, la croissance de la demande en ressources naturelles, les pratiques de gestion non durable, une contrainte supplémentaire importante. La vulnérabilité dépend des circonstances économiques et des infrastructures institutionnelles. On admet en général que les systèmes sont plus vulnérables dans les pays moins développés, où les facteurs précédents sont moins favorables.

Nous reviendrons sur ce changement climatique dans le chapitre suivant, mais il apparaît déjà clairement que ce phénomène constitue un enjeu important pour l'avenir du monde. L'atmosphère a perdu son statut de ressource inépuisable, il s'agit maintenant de lui trouver une forme de gestion durable , c'est à dire *qui satisfasse aux besoins des générations présentes sans compromettre la capacité des générations futures à satisfaire les leurs* (CMED[4]). C'est une occasion sans précédent d'asseoir une partie des relations internationales sur un projet commun à l'humanité. Mais les difficultés sont nombreuses, et nous allons ici nous intéresser seulement à quelques unes, celles qui se rapportent à l'irréversibilité.

GES	CO_2	CH_4	NO_2
niveau avant 1750	280 ppmv	700 ppbv	275 ppbv
niveau 1992	359 ppmv	1720 ppbv	310 ppbv

Tableau 1.1 : Concentration de trois gaz à effet de serre en 1750 et 1992.

	Pression à la surface, comparée à l'atmosphère terrestre	Principaux gaz à effet de serre	Température de surface calculée sans l'effet de serre	Température de surface observée	Réchauffement du à l'effet de serre
VENUS	90	>90% CO_2	-46°C	477°C	523°C
TERRE	1	~0.04% CO_2 ~1% H_2O	-18°C	15°C	33°C
MARS	0.007	>80% CO_2	-57°C	-47°C	10°C

Tableau 1.2 : Ordre de grandeur de l'effet de serre: Terre, Vénus, Mars

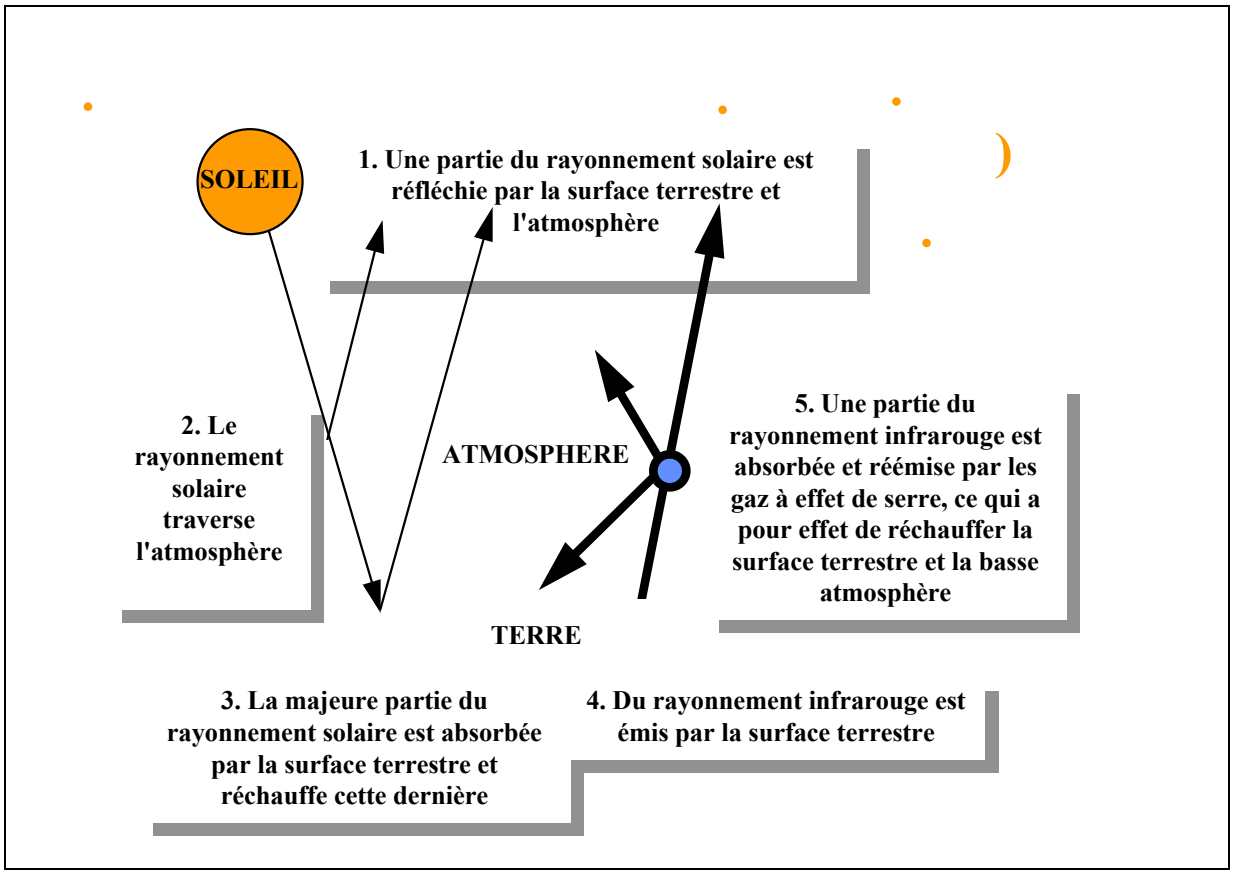


Figure 1.1 : Schéma simplifié de l'effet de serre.

Tableaux et Figure auteur, d'après le Résumé destiné aux décideurs du Rapport du GIEC, Groupe de Travail I, 1990.

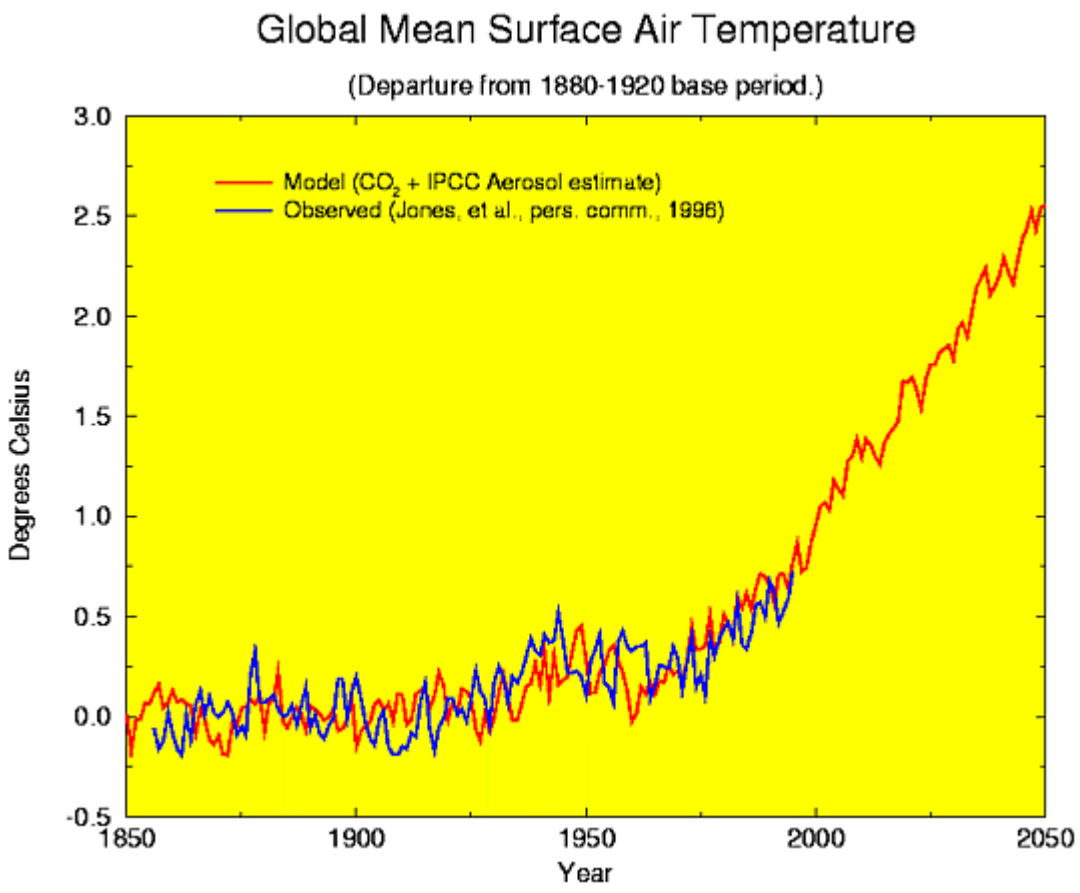


Figure 1.2 : Évolution de la température moyenne globale.

En rouge, jusqu'en 2050, profil temporel de la température globale moyenne de la surface terrestre, calculée par le modèle géophysique océan-atmosphère développé au Geophysics Fluids Dynamics Laboratory (GFDL). En bleu, courbe des températures observées : on observe déjà un certain réchauffement. Mais celui ci reste faible devant les variations annuelles. L'Évolution future calculée est plus préoccupante, avec un réchauffement de l'ordre de 2,5°C au milieu du XXIe siècle. Les résultats de ce modèle du GFDL sont comparables aux autres modèles numériques existants. Ils sont un peu au dessus du milieu de la fourchette d'incertitude définie par les experts. Source: www.gfdl.gov

L'effet de serre a des conséquences sur tous les paramètres du climat, il ne se limite pas à l'augmentation de la température moyenne globale. La montée du niveau moyen des mers pourrait affecter les communautés côtières avec des inondations plus fréquentes et une salinité plus importante des nappes phréatiques. Des changements dans le régime des pluies et dans l'humidité du sol auraient des conséquences importantes sur l'agriculture. A ce jour, la fiabilité des prévisions concernant les températures est supérieure à celles concernant le cycle hydrologique, et il reste difficile de prédire le changement climatique à l'échelle régionale. Mais globalement, considérant que la vitesse du réchauffement à la fin de la dernière glaciation était de l'ordre de 1°C par millénaire*, alors que le climat s'est déjà réchauffé de 0.5°C au XXe* siècle *et que l'on attend beaucoup plus au prochain, on comprend qu'il est probable que des changements rapides et imprévus pourront avoir lieu. Au total, les conséquences pour beaucoup d'écosystèmes du monde pourraient être sérieuses.*

Il est encore plus difficile de faire des prévisions fiables sur les impacts du changement climatique sur les activités humaines. La situation sanitaire publique, les écosystèmes terrestres et aquatiques, ainsi que les systèmes socio-économiques (agriculture, pêche, sylviculture, ressource en eau) sont tous vitaux pour le développement humain et le bien être, et sont tous sensible à l'importance et à la vitesse du changement climatique. Bien que beaucoup de régions vont probablement subir des conséquences négatives du changement climatique, parfois irréversibles, certaines vont bénéficier d'effets positifs. Les différents segments de la société peuvent s'attendre à être confrontés à toute une variété de changements et de demandes d'adaptation.

1.3. Les enjeux en France et dans le monde

Avant de donner un premier aperçu de notre problématique, illustrons avec la France l'importance des enjeux locaux du changement climatique. Au niveau de la politique intérieure, le débat a longtemps été confisqué par le gouvernement, dont l'action première aura surtout été de commander un rapport (Académie des Sciences, 1994[5]) et de créer une commission. Cette situation est regrettable, mais c'est l'exception parmi les pays développés. Toutefois, le sujet a connu une certaine effervescence médiatique et politique[6] à l'occasion de la conférence de Kyoto en décembre 1997.

Au niveau de l'action diplomatique extérieure, la communication nationale française à la Conférence des Parties de la Convention Climat (1995[7]) doit se lire à la lumière de deux faits importants :

- L'impact du changement climatique concerne directement l'agriculture et le tourisme. Toutefois, il pourrait s'avérer relativement modéré en France, en comparaison avec des pays moins développés ou plus exposés à une élévation du niveau de la mer. Mais ce impact pourrait s'avérer brutal si la dynamique du Gulf Stream était déstabilisée.
- A cause de l'option nucléaire, les émissions par tête de CO_2 sont relativement faibles (43e rang mondial en 1991[8]). Comme la Figure 1.3 le montre, ces émissions ont diminué depuis les années 80. Ce faible niveau d'émissions impliquerait des coûts marginaux de réduction plus élevés que dans d'autres pays développés, puisqu'une large part des gisements d'économies d'énergies auraient déjà été exploitée. Le changement climatique concerne donc aussi la politique énergétique nationale.

Agriculture et tourisme d'une part, énergie de l'autre, on voit que les enjeux locaux sont importants. Au niveau plus global, ces deux points illustrent les deux versants du risque provenant du changement climatique. D'un côté, le risque direct du changement climatique sur la société qui va perturber le niveau de la mer, la température. De l'autre côté, le risque dit inversé[9] illustré, qui provient des effets néfastes des mesures prises pour atténuer le premier. Examinons, Tableau 1.3 et Tableau 1.4, quelques exemples qui illustrent ces deux notions, ainsi que le vocabulaire associé.

- Les réserves d'énergie fossile contiennent suffisamment de carbone pour affecter le climat plus gravement qu'une glaciation inversée. Outre la hausse du niveau de la mer et l'augmentation de la fertilisation des plantes par le CO_2, les perturbations locales et le réchauffement global du climat sont parmi les principaux effets directs. La littérature spécialisée nomme "dommages" ou "impacts" les coûts associés. Dans l'analyse coût-bénéfice du changement climatique, ces dommages évités sont les **bénéfices**.

- Le risque inversé provient du fait que taxer l'utilisation du carbone perturbe les marchés, qui pourrait avoir des effets macroéconomiques récessifs *a priori*. Certains pays et certains secteurs économiques prévoient d'être affecté négativement par la lutte contre l'effet de serre. On nomme **coûts de réduction** les coûts associés à la réduction et aux limitations des émissions de gaz à effet de serre.

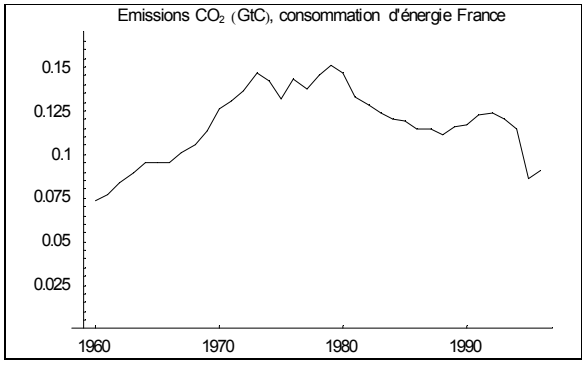


Figure 1.3 : Évolution des émissions de CO_2 en France, 1960-1996.

Source auteur, d'après données Enerdata et avec les coefficients de conversion consommations d'énergie primaire en GJ vers émissions de CO_2 en GtC :

charbon	*$25.8\ 10^{-12}$*
gaz	*$15.3\ 10^{-12}$*
pétrole	*$20.0\ 10^{-12}$*
biomasse	*$21.2\ 10^{-12}$*

L'ampleur de chacun de ces risques est très incertaine. Notons également que leur durée d'Évolution correspond au très long terme des économistes : la génération. Malgré ces deux obstacles majeurs, la communauté scientifique, représentée par le Groupe d'Experts Intergouvernemental sur l'Évolution du Climat (GIEC) ne recule pas devant les modèles d'évaluation des coûts et des bénéfices de la lutte contre le changement climatique. Ces modèles, numériques, analytiques ou littéraires, doivent prendre en compte toutes les sources de valeur économique liées au problème.

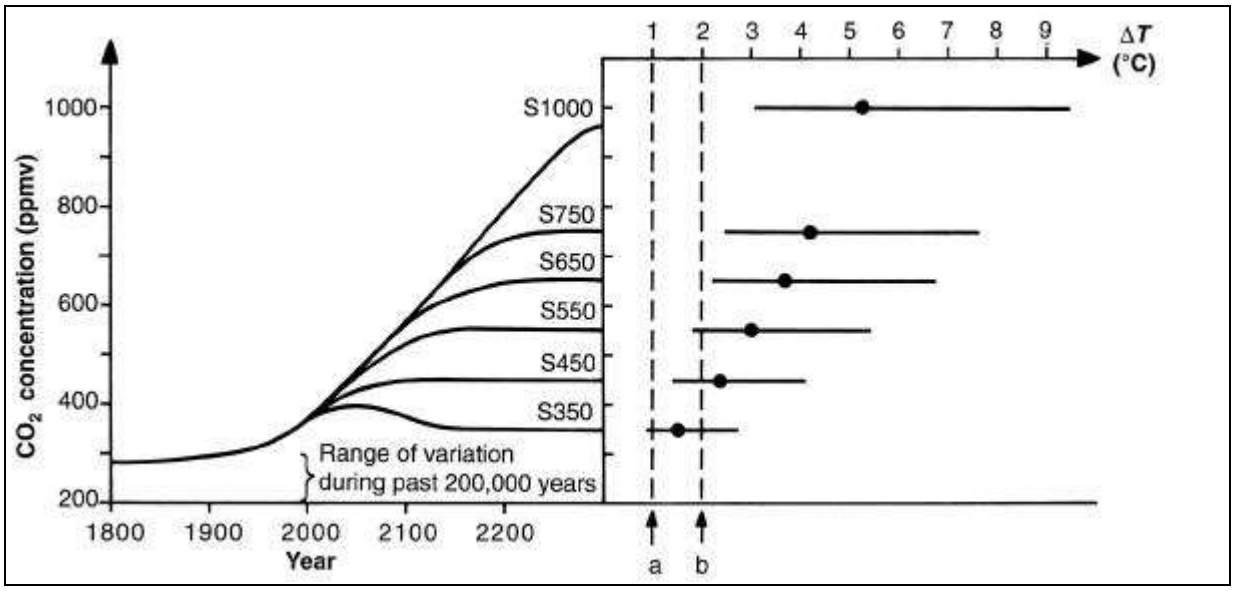


Figure 1.4 : Stabilisation du CO_2 atmosphérique et variation de température.

(A gauche) Scénarios GIEC de stabilisation du CO_2 atmosphérique. (A droite) Changements de la température moyenne globale correspondant par rapport au niveau préindustriel (valeur centrale plus plage d'incertitude), estimé par le GIEC(GW I, 1995). Source : D'après Azar et Rodhe, 1997. L'effet des GES autres que le CO_2 est compté pour 1 W/m□ . Les lignes pointillées verticales représentent (a) L'intervalle de variabilité de la température moyenne globale estimé pour les 1000 dernières années et (b) Le changement de température considéré comme très risqué par le Stockholm Environment Institute (1990)

Pétrole	Conventionnel	160
	Non conventionnel	300
Gaz	Conventionnel	140
	Non conventionnel	400
Charbon		3 170

Tableau 1.3 : Réserves de carbone

Contenu en carbone des réserves mondiales d'énergie fossile (potentiel technique maximal des ressources), GtC. (déduit de GIEC, 1996)

S650	1110 ± 80
S550	930 ± 60
S450	640 ± 50

Tableau 1.4 : Emissions permises

Emissions cumulées de carbone (GtC) entre 1990-2100 pour différents scénarios de stabilisation. (GIEC, 1996)

1.4. La thèse défendue ici

L'économie de l'environnement et des ressources naturelles est appelée à apporter des éclairages nécessaires à la question "Comment évaluer les coûts et les bénéfices dans le problème du changement climatique ?". Depuis plusieurs décennies, les économistes ont reconnu la valeur d'option et l'effet d'irréversibilité. Or la constitution d'un stock de gaz à effet de serre dans l'atmosphère et un éventuel changement dans sa dynamique chimique ainsi que la déforestation sont des effets irréversibles. Il convient donc d'inclure la valeur de l'irréversibilité dans l'analyse du problème du

changement climatique global. C'est pourquoi nous formulerons la question principale de notre thèse ainsi :

Comment tenir compte de l'irréversibilité dans l'évaluation intégrée du changement climatique ?

La particularité de notre approche, suivant peut être en cela le « style » scientifique du CIRED, est que nous traitons le sujet d'abord sous l'angle pratique, en subordonnant la théorie. Donc si nous proposons une vue originale, peut-être nouvelle, sur la valeur de quasi-option et de l'effet d'irréversibilité (Ha-Duong, 1997[10]), nous nous sommes d'abord attachés à éclairer le problème concret du changement climatique, en intervenant dans un débat scientifique contemporain (Ha-Duong, Grubb et Hourcade, 1997[11]). Et puisqu'une thèse autorise, voire demande un certain parti pris, concluons cette introduction générale en annonçant clairement que notre travail tend à montrer que :

La prise en compte de l'irréversibilité dans l'évaluation du changement climatique contribue à justifier une action de réduction des émissions de GES sensible à court terme.

2. *Problématique.*

Dans ce paragraphe, nous allons distinguer l'irréversibilité absolue, l'impossibilité d'un retour à l'état initial, de l'irréversibilité des choix, qui est que les choix à court terme modifient les conditions dans lesquelles se prennent les choix à long terme. La première section définit ces irréversibilités sous un angle plutôt mathématique, la seconde les replace ensuite par rapport aux conceptions physiques de la thermodynamique et de l'entropie. La section suivante examine les figures de l'irréversibilité en économie, puis enfin nous verrons la place de l'incertitude par rapport à l'irréversibilité dans le problème du changement climatique.

2.1. Irréversibilité absolue, inertie, flexibilité et irréversibilité des choix

Le sens intuitif du mot irréversibilité, c'est quand quelque chose se fait qui ne peut plus être défait ensuite, par exemple abattre une forêt ou laisser un sol se latériser. Cependant, compte tenu des divers aspects évoqués précédemment comme l'accumulation du capital ou le progrès technique, dans cette section nous allons modérer la notion d'irréversibilité absolue pour aboutir à la notion d'irréversibilité des choix qui nous occupera dans la suite.

⇒ *L'irréversibilité absolue*

Examinons une première définition formelle ensembliste de l'irréversibilité, illustrée Encadré 1.1. L'irréversibilité est liée au temps : elle ne caractérise pas un système à un instant donné comme le font les variables d'état. Le concept d'irréversibilité caractérise une Évolution, un passage entre deux

A, B, C ... : Etats possibles du système.

$A \rightarrow B$: Action de passer de A vers B, ou encore de choisir de B à partir de A.

$\mathsf{F}(X)$: Ensemble des états atteignables à partir de l'état X. Par exemple, $\mathsf{F}(A) = \{A, B, C\}$

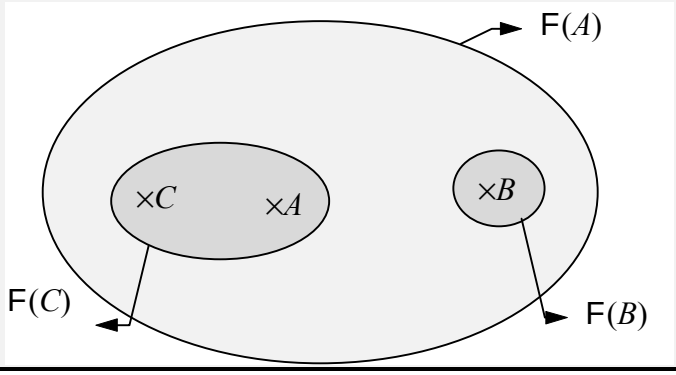
Irréversibilité absolue : $A \rightarrow B$ est **irréversible** ssi $A \notin \mathsf{F}(B)$. En ce sens, dans l'illustration ci-dessous $A \rightarrow B$ est irréversible mais pas $A \rightarrow C$ ni $A \rightarrow A$.

Irréversibilité des choix : $A \rightarrow B$ est **irréversible** ssi $\exists\ C \in \mathsf{F}(A)$ tel que $\mathsf{F}(B)$ ne contient pas $\mathsf{F}(C)$. En ce sens, dans l'illustration ci-dessous $A \rightarrow B$ *et* $A \rightarrow C$ sont tous deux irréversibles mais pas $A \rightarrow A$.

Flexibilité : Définissons la flexibilité comme une relation d'ordre sur des ensembles atteignables, le diagramme illustrant deux cas simples (la relation d'ordre choisie est l'inclusion) :

B n'est **pas flexible** du tout ssi $\mathsf{F}(B)$ comprend un seul élément.

A est **plus flexible que** B ssi $\mathsf{F}(A)$ est plus grand que $\mathsf{F}(B)$



Encadré 1.1 : Flexibilité, irréversibilité absolue et irréversibilité des choix.

états. Ce passage s'effectue entre un instant initial et un instant final. Toutefois, la définition formelle qui suit permet de comprendre qu'il y a plus que deux instants en jeu lorsque l'on parle d'irréversibilité, il y en a trois.

Considérons un système quelconque, qui évolue entre deux états. Appelons A l'état de ce système à la date 1, et B l'état de ce système à la date 2. Notons $\mathsf{F}(A)$ l'ensemble des états qu'il est possible d'atteindre à partir de A, et $\mathsf{F}(B)$ l'ensemble des états qu'il sera possible d'atteindre, à la date 3, à partir de B. La fonction F décrit l'ensemble des états atteignables à partir d'un état donné.

L'état B est évidement dans $\mathsf{F}(A)$, et on n'a rien à dire de plus sur cet ensemble pour l'instant. Mais l'état initial A est il dans $\mathsf{F}(B)$? Si oui, on peut dire que l'Évolution de A vers B, notons là $A \rightarrow B$, est réversible. L'irréversibilité, c'est lorsque A n'est pas dans $\mathsf{F}(B)$.

Dans cette définition, on voit que l'irréversibilité fait intervenir trois instants. Le premier est le moment où l'on est en A. Le second est celui où on est en B. Le troisième est celui où l'on voudrait être à nouveau en A. Dans notre application au changement climatique, la première date correspondra au présent. La seconde date correspondra au long terme en économie, c'est à dire quelques décennies. La troisième date sera le très long terme, c'est la seconde moitié du siècle prochain. Nous verrons plus bas certaines des difficultés que soulève ce très long terme.

⇒ *Inertie et flexibilité*

L'irréversibilité pure et parfaite est une idéalisation, et il est utile de pouvoir adoucir cette notion. En fait, certains phénomènes irréversibles le sont moins lorsque l'on passe à une échelle de temps plus large. L'accumulation des gaz à effet de serre est un exemple immédiat, selon qu'on le mesure à l'échelle humaine ou à l'échelle géologique. Examinons deux termes qui pourraient sembler se rapporter à des notions moins absolues que l'irréversibilité :

- La difficulté de faire changer un système peut s'appeler son inertie, par analogie avec le concept physique. Un objet doué d'une grande inertie, comme une machine à laver, nécessite une grande force pour le retourner ou le déplacer. Les changements de position qu'il pourrait subir seront donc plus irréversibles, et on ne s'amuse pas à déplacer son lave linge tous les jours. A contrario, un objet de faible inertie qui a été déplacé, comme un vase, peut être replacé facilement dans sa position de départ.[a]
- Une notion complémentaire qui permet de graduer la réversibilité est celle de flexibilité. Après un choix irréversible, la situation n'est pas flexible du tout. Une action difficile a défaire est dite peu flexible, et au contraire une action qui n'engage à rien préserve la flexibilité. Remarquons que plus de flexibilité c'est moins d'irréversibilité, les notions vont en sens contraire l'une de l'autre.

⇒ *L'inertie n'est pas l'irréversibilité graduée*

Pour reprendre les notations formelles, si l'état B est inerte ou s'il est peu flexible, l'ensemble atteignable que l'on avait appelé $\mathsf{F}(B)$ est « petit ». La flexibilité et l'inertie[b] sont des propriétés qui décrivent une capacité que possède quelque chose à évoluer. Cette capacité est décrite à un instant donné, il s'agit de variables d'état.

---

[a]Soit un objet de masse d'inertie m caractérisé par une vitesse A. Pour diriger ce corps, nous disposons d'une quantité d'énergie fixée E. Au maximum, on pourra l'accélérer jusqu'à $B = \sqrt{A^2 + 2\frac{E}{m}}$, résultat obtenu par un petit calcul élémentaire sur l'énergie cinétique. L'ensemble des vitesses atteignables est l'intervalle $\mathsf{F}(A) = [\sqrt{|A^2 - 2\frac{E}{m}|}, \sqrt{A^2 + 2\frac{E}{m}}]$. La largeur de cet intervalle diminue bien avec m, dans les deux sens.

[b] Le terme strictement réciproque de flexibilité est rigidité. La distinction fine entre rigidité et inertie est que le premier s'applique à des systèmes essentiellement au repos, alors que l'inertie va avec le mouvement.

Ces deux concepts ne peuvent donc pas recouper complètement l'idée d'irréversibilité qui n'en est pas une. Quand on qualifie une action d'irréversible, on peut comprendre que l'action est beaucoup plus difficile à défaire qu'à faire. On a donc une idée de situation asymétrique, la pensée pouvant être orientée par la flèche du temps. Quand on dit qu'un système est inerte ou flexible, cela s'applique à tous les changements que l'on veut lui faire subir, symétriquement. En perdant la référence au temps, on perd l'asymétrie. On est par exemple obligé de préciser que les salaires sont "flexibles à la hausse, mais pas à la baisse".

Il existe toutefois des liens entre ces deux concepts et l'irréversibilité : une transformation qui augmente l'inertie est en général irréversible. Illustrons-le par un exemple géométrique et champêtre. Soit une sauterelle (on réinterprète la figure de l'Encadré 1.1 comme le plan du champ). Pour se déplacer, elle considère tous les endroits qu'elle peut voir, puis saute au hasard sur l'un d'entre eux. Nous supposerons que la vision porte également dans toutes les directions. L'insecte est en haut d'un brin d'herbe. Ses yeux à facettes lui montrent une vaste portion de prairie, au moins plusieurs dizaines de cm². De son poste stratégique, l'insecte possède une grande capacité à évoluer. Un saut l'amène au sol. Du sol, elle ne pourra plus voir grand chose d'autre que les quelques brins d'herbe autour d'elle. Sa capacité à évoluer a bien diminué. En particulier, son point de départ n'est plus visible, car il est trop loin. Le déplacement est donc irréversible.

Cet exemple montre qu'une transformation qui perd de la flexibilité est en général irréversible. A l'extrême, perdre toute la flexibilité, c'est perdre toutes les options possibles sauf une. D'ordinaire, la seule option conservée n'est pas celle de revenir en arrière, car on cherche rarement à faire quelque chose pour être sûr d'avoir à le défaire ensuite.

Considérons d'autres exemples. Deux oeufs gisent près d'un bol et d'une fourchette. La situation est flexible dans la mesure où on peut faire beaucoup de recettes: des crêpes, une omelette, des oeufs à la neige, une crème ou même ranger le tout et aller au restaurant. Maintenant, si je casse ces oeufs et les bat, la situation est moins flexible (mais je peux encore choisir entre les crêpes et l'omelette). Au passage, il y a bien eu irréversibilité par réduction de l'ensemble des choix. Bien sûr, il existe des exceptions. En alpinisme, par exemple, quand on est parvenu au sommet la situation est moins flexible que quand on était dans son lit le matin, parce qu'on a juste le choix de redescendre, mais elle est réversible, puisqu'on va redescendre.

⇒ *L'irréversibilité des choix*

Une notion de type tout ou rien ne peut pas être quantifiée. C'est pourquoi, pour tenir compte de l'irréversibilité dans l'évaluation du changement climatique, nous avons besoin d'une notion qui ne soit pas aussi stricte que celle d'irréversibilité absolue (impossibilité d'un retour à l'état initial). Une première tentative était d'utiliser l'inertie ou la flexibilité, mais ce qui précède montre que ces notions ne mesurent pas directement l'irréversibilité.

Ce qui nous importe finalement, c'est d'étudier comment les choix présents modifient les conditions des choix futurs. Par exemple, épuiser un gisement minéral aujourd'hui empêche de l'exploiter demain. En contre exemple, jouer une grille de Loto est certes irréversible au sens absolu, mais cela ne me fait pas significativement perdre d'options pour mes choix futurs.

Pour exposer formellement ce concept, considérons une situation de choix binaire, c'est à dire qu'à partir de l'état présent A, il est possible d'atteindre seulement B ou C, situation que nous notons $\mathsf{F}(A) = \{B , C\}$. L'irréversibilité qui nous intéresse n'est pas de savoir si A est dans $\mathsf{F}(B)$, mais c'est que si on choisit B, alors on pourra ensuite aller dans $\mathsf{F}(B)$, tandis que si on choisit C, alors on pourra ensuite atteindre un $\mathsf{F}(C)$. Le choix de l'action $A \rightarrow B$ est irréversible lorsque qu'il existait au moins une alternative $A \rightarrow C$ qui offrait des perspectives d'Évolution différentes, c'est à dire telle que $\mathsf{F}(C)$ soit différente de $\mathsf{F}(B)$. Plaçons maintenant l'irréversibilité du choix par rapport à l'inertie et à l'irréversibilité absolue :

- Lorsque l'action $A \rightarrow B$ est irréversible et qu'il existe une alternative $A \rightarrow C$ qui ne l'est pas, alors il y a irréversibilité du choix B puisque $A \notin \mathsf{F}(B)$ mais $A \in \mathsf{F}(C)$, donc $\mathsf{F}(B)$ ne contient pas $\mathsf{F}(C)$.

- Lorsque l'état B est moins flexible que l'état C, alors il y a aussi irréversibilité du choix entre B et C puisque $\mathsf{F}(B)$ est plus petit que $\mathsf{F}(C)$, donc ne le contient pas.

Toutefois, on peut envisager le cas où, bien que les conséquences immédiates des actions $A \rightarrow B$ et $A \rightarrow C$ diffèrent, les perspectives qu'elles ouvrent $\mathsf{F}(B)$ et $\mathsf{F}(C)$ sont les mêmes, et n'incluent pas le retour à l'état initial A, alors, malgré l'irréversibilité absolue, il n'y a pas d'irréversibilité du choix (exemple du Loto).

Dans cette thèse, nous ne nous préoccupons pas tant de l'irréversibilité absolue que de l'irréversibilité des choix : le fait que les décisions prises aujourd'hui modifient les conditions dans lesquelles les décisions seront prises demain. Dans la suite, le lecteur est donc prié d'entendre l'irréversibilité dans ce sens, qui n'est pas le sens usuel.

2.2. Irréversibilité thermodynamique et entropie.

Nous avons défini au paragraphe précédent l'irréversibilité des choix par rapport à l'irréversibilité absolue. Comparons maintenant l'irréversibilité des choix avec l'irréversibilité thermodynamique, puis examinons si la notion d'entropie pourrait être utile dans cette thèse.[a]

⇒ *Différence entre l'irréversibilité des choix et l'irréversibilité thermodynamique*

Revenons sur l'exemple de la sauterelle. Formellement, le sommet du brin d'herbe du début est A. La portion de prairie visible depuis A correspond au territoire atteignable que nous avons noté $\mathsf{F}_{\text{sauterelle}}(A)$. Le point B est au sol. Le rayon de visibilité au sol r^B est nettement inférieur au rayon de visibilité perché r^A. Mais la longueur du saut $\mathrm{d}(A, B)$ est de l'ordre de r^A , en moyenne[b]. C'est pourquoi, le plus souvent, $r^B < \mathrm{d}(A, B)$. Et donc A n'est pas atteignable depuis B, la transformation est irréversible. L'irréversibilité de l'action $A \rightarrow B$ provient de la perte de flexibilité, c'est à dire du fait que $\mathsf{F}_{\text{sauterelle}}$ diminue entre A et B.

Comparons cela à l'expérience usuelle de l'expansion d'un gaz: Séquestration du gaz dans une moitié du volume (état A), ouverture du robinet et expansion totale du gaz (état B). La transformation est irréversible. Notons G le nombre d'états microscopiques atteignables par le système constitué de l'ensemble des molécules du gaz. L'irréversibilité provient du fait que G a considérablement augmenté entre A et B, et donc la probabilité qu'un point pris au hasard dans l'espace des phases correspondant à l'état B décrive l'état A est infinitésimale.

Certes, l'irréversibilité thermodynamique se distingue de l'irréversibilité absolue puisqu'il est possible, de ramener le gaz dans son demi volume initial avec un piston. Mais on pourrait être troublé par le fait que dans le premier cas, l'irréversibilité provient de la diminution du nombre d'états atteignables $\mathsf{F}_{\text{sauterelle}}$ et dans le second de l'augmentation du nombre d'états atteignables G . En fait la même expression 'nombre d'état atteignables' en désigne deux notions F et G bien différentes.

- D'une part, pour G, on parle du cardinal de l'ensemble des configurations microscopiques possibles qui décrivent un état macroscopique donné A. Il est question d'un système isolé à l'équilibre thermodynamique. Après 'atteignables', on sous-entend donc 'à grandeurs

[a] Outre la polysémie, comme de plus la notion apparaît liée à d'autres questions profondes : l'écoulement du Temps, l'Information et l'Incertitude, l'Ordre et l'Entropie, il n'est pas surprenant que de nombreux volumes aient été écrits sur l'irréversibilité, aussi bien en physique qu'en économie (Boyer et al., 1991; Georgescu-Roegen, 1971), tous très techniques. Ce paragraphe aussi a un caractère d'annexe technique, mais nous avons jugé que sa longueur de deux pages ne justifierait pas un déplacement à la fin du document.

[b] Cela est encore plus vrai lorsque l'état du système est dans un espace de dimensionalité élevée. Dans une hyperboule de dimension n grand, toute la masse est près de la surface. Cela veut dire que quand on prend un point au hasard dans une telle hyperboule, la probabilité que ce point soit à une distance $<\varepsilon$ de la surface de la boule tend vers 1 lorsque n tend vers l'infini.

thermodynamiques constantes'.

- De l'autre, pour $\mathsf{F}(A)$, on parle du nombre des états auxquels peut aboutir le système à partir d'un état donné A, pour un ensemble de transformations donné a priori, qui peut correspondre à un changement des grandeurs physiques. Après 'atteignables', on sous entend donc 'compte tenu des contraintes particulières de l'Évolution entre les deux instants considérés'.

Puisque dans l'expérience du gaz, on pose que le robinet sera ouvert à l'instant 2, alors les états atteignables à partir de la situation A sont tous ceux de B, on a donc $\mathsf{F}_{gaz}(A) = \mathsf{G}(B)$. Au delà, nous n'avons pas décrit quelles Évolutions sont envisagées après l'expansion du gaz, et donc on ne peut pas définir $\mathsf{F}_{gaz}(B)$. La question de savoir si le gaz a gagné ou perdu de la flexibilité ne peut pas être posée. Bien qu'homonymes, l'irréversibilité des choix et l'irréversibilité thermodynamique sont donc bien deux notions différentes.

⇒ *Irréversibilité des choix et entropie*

L'entropie et sa variation positive sont des mesures liée à l'irréversibilité en physique. Nous allons voir que cette notion ne se transpose pas à l'irréversibilité des choix. Pour cela, examinons l'entropie par la théorie de l'information.

Certes, nous avons bien vu qu'une Évolution $A \rightarrow B$ qui perd de la flexibilité correspond à une situation dans laquelle l'ensemble $\mathsf{F}(B)$ des états atteignables à partir de l'arrivée B est plus petit que l'ensemble $\mathsf{F}(A)$ des états atteignables à partir du départ A.

De plus, la taille de $\mathsf{F}(A)$ mesure aussi l'ignorance a priori sur l'état qui sera atteint après A. Lorsque $\mathsf{F}(A) = \{B\}$, on sait par avance que l'état B succédera à A. Lorsque $\mathsf{F}(A)$ est grand, quand on observe le nouvel état on gagne beaucoup d'information. On a le droit d'appeler entropie de l'état A le log du cardinal de $\mathsf{F}(\mathrm{A})$, et de vouloir identifier ce nombre avec une mesure de la flexibilité des choix.

Cependant, cela ne présente guère d'intérêt pour plusieurs raisons :

- Nous avons donné une définition de l'irréversibilité des choix qui ne se ramène pas à une simple diminution de la flexibilité. Il n'y a donc pas d'intérêt direct à mesurer celle-ci.
- Même si il y avait intérêt à définir une telle mesure de flexibilité, le choix de la fonction logarithme ne serait pas justifié, car les situations auxquelles cette thèse s'intéresse ne correspondent pas à des tirages aléatoires successifs indépendants[a]. Au contraire, nous étudions explicitement la façon dont un premier choix influence un second choix.

Nous avons vu jusqu'ici que l'irréversibilité des choix n'est pas l'irréversibilité absolue, et si elle la généralise ce n'est toutefois pas systématique (cas du Loto). Elle se distingue aussi de l'irréversibilité thermodynamique, et elle n'est pas mesurée par la variation d'une entropie. Nous ne reviendrons plus sur ces caractères généraux de l'irréversibilité.

2.3. Les figures de l'irréversibilité en économie.

Nous allons voir maintenant que même en restant dans le strict domaine de la science économique le thème reste très large, comme le montrent les travaux édités par Boyer, Chavance et Godard (1991). Puis nous examinerons deux concepts fondamentaux en économie pour traiter de l'irréversibilité: la flexibilité et les coûts d'ajustement.

[a] Lorsque l'on considère une situation dans laquelle deux tirages indépendants doivent être faits, le nombre d'issues possibles est égal au *produit* des nombres d'issues possibles pour chacun des choix. En définissant l'entropie comme le *logarithme* du nombre d'issues possibles, l'entropie de la situation où on doit faire les deux choix indépendants est la *somme* des entropies initiales.

⇒ *Un thème de recherche fédérateur*

La question de la prise en compte de l'irréversibilité, au delà des aspects strictement géophysiques, concerne de nombreux champs de recherche actuels en économie :

- Le calcul de la valeur des options est au centre des recherches récompensées par le prix Nobel 1997[12] et portant sur sur les produits dérivés en finance. Il concerne aussi directement les développements récents de la théorie de l'investissement exposés par exemple par Pindyck (1996[13]). Il est également relié à la théorie de l'effet d'irréversibilité et de la valeur de quasi-option, que nous allons examiner dans cette thèse.

- Le développement technologique est au centre des nouvelles théories de la croissance, qui reconnaissent qu'à long terme la technologie n'est pas une donnée mais une variable endogène[14]. Tout comme le CO_2 dans l'atmosphère, le capital immatériel est un stock qui s'accumule, ce qui crée une première source d'irréversibilité sur la quantité. Une seconde source concerne la qualité de ce capital. En effet, le progrès technologique peut être différencié, favorisant irréversiblement certains choix économiques. La prédominance du moteur à quatre temps par rapport aux autres modes de propulsion automobile fournit un exemple de 'lock-in' technologique. Goulder[15] montre aussi que favoriser les technologies nouvelles peut induire une perte en évinçant la R&D sur des technologies classiques ('crowding out'). La dynamique d'accumulation du savoir faire technologique, les économies d'échelle et les phénomènes d'apprentissage, sont autant de thèmes de recherche contemporains importants en eux-mêmes, et critiques pour bien appréhender le problème de la modération du changement climatique.

- L'irréversibilité émergeant de la création de conventions entre les agents, par exemple lorsqu'ils coordonnent leurs anticipations vers un but commun, qui devient une prophétie auto-réalisatrice[16]. Le choix du nucléaire en France illustre cette émergence dans le domaine énergétique. Pour illustrer autrement comment une coordination peut se produire, examinons la question dans le domaine forestier du choix de l'espèce plantée majoritairement par les propriétaires privés. Lorsque beaucoup de propriétaire plantent du pin Douglas, les scieries s'équipent pour cette essence, ce qui rend son choix encore plus intéressant pour les propriétaires. Ce type d'irréversibilité est d'autant plus important que la résolution du problème du changement global implique de nombreux agents indépendants, comme les Etats, les industries et les autres composantes des sociétés civiles.

- L'irréversibilité est enfin au centre de la recherche d'une définition du "Développement soutenable", un sujet encore ouvert et actif, notamment depuis le rapport Bruntland[17].

Ces quatre thèmes montrent combien l'irréversibilité, au sens large, est un thème fédérant aujourd'hui une grande part de la recherche en économie. Examinons maintenant deux aspects spécifiquement liés à ce que nous avons appelé plus haut l'irréversibilité des choix.

⇒ *Le besoin de flexibilité*

De grands économistes comme P. Romer et C. F. Bergsten considèrent que la flexibilité est l'un des premiers facteurs expliquant la croissance de l'économie américaine (voir Encadré 1.2). La flexibilité est perçue comme une vertu d'autant plus nécessaire que le monde change de plus en plus rapidement. Il est en effet intuitif a priori que plus le futur est incertain plus il importe de pouvoir s'adapter vite, cependant nous allons modérer cette intuition dans la suite.

Empiriquement par exemple, Eric Haites[18] remarque que face à l'augmentation des incertitudes sur les conditions futures des marchés, créées entre autres mais pas exclusivement par la question de la réglementation des émissions de GES, les entreprises américaines de production d'électricité ont réagit en raccourcissant le cycle de vie de leurs investissements.

Toutefois, la prise en compte de ce besoin de flexibilité dans des études économiques chiffrées est une pratique difficile. Comme nous le verrons dans la suite, cette remarque s'applique en particulier aux modèles d'évaluation intégrés du changement climatique. Pourtant, nous allons proposer qu'il existe une notion théorique appropriée pour mesurer le degré de flexibilité : les coûts d'ajustement.

⇒ *Les coûts d'ajustement*

Ajuster sa capacité de production coûte plus ou moins cher à une entreprise. Au début, pour augmenter la production il peut suffire de faire tourner davantage des équipements sous-utilisés, ou de mieux utiliser ceux ci. Mais au delà, il vient un point à partir duquel il faut investir. L'achat de ce

Pourquoi la flexibilité est-elle source de prospérité ? Est-il possible pour d'autres pays de reproduire les recettes du succès américain ? La réponse est probablement oui. *"La vraie question est de savoir si une économie peut, à n'importe quel moment et à partir d'un ensemble déterminé de ressources, répartir celles-ci de manière à les rendre aussi productives que possible"*, explique Paul Romer, un économiste de Stanford. *"Si on gèle ces ressources là où elles se trouvent, quand de nouvelles possibilités se présentent, on n'est plus en mesure de réagir."* Réaffecter les ressources consiste, notamment, à licencier des salariés sans le moindre état d'âme, une pratique prisée par les américains qui remplit d'horreur la plupart des Européens et des Japonais. Storage Technology, un fabriquant d'unités de disques installé à Denver, enregistre des bénéfices records en partie parce qu'il s'est séparé de 1 700 salariés - soit 15 % de ses effectifs - en moins de deux ans, reconnaît David Weiss, président de cette société. Sur le long terme, une économie crée généralement des richesses nouvelles si elle ne s'accroche pas désespérément à celles qui existent. *"Nos entreprises ont la possibilité de licencier. Et cela leur permet d'embaucher",* assène l'économiste C. Fred Bergsten. *"Leurs homologues japonaises et allemandes ne peuvent pas licencier. Alors elles n'embauchent pas."* Certes, d'autres facteurs expliquent le progrès américain : la taille du marché et la mobilité, des entreprises tout comme celle des salariés d'un Etat à l'autre. Si les Américains font preuve d'innovation, c'est aussi parce qu'ils acceptent l'idée que l'on puisse échouer en affaires, ce qui est mal vécu dans d'autres pays. Ils admirent aussi les réussites rapides, qu'ailleurs on juge vulgaires.

Encadré 1.2 : Cette vertu appelée flexibilité.

Jacob M. Schlesinger - The Wall Street Journal (extraits) - New York. Traduction Le Courrier International *(n° 350, du 17 au 23 Juillet 1997)*

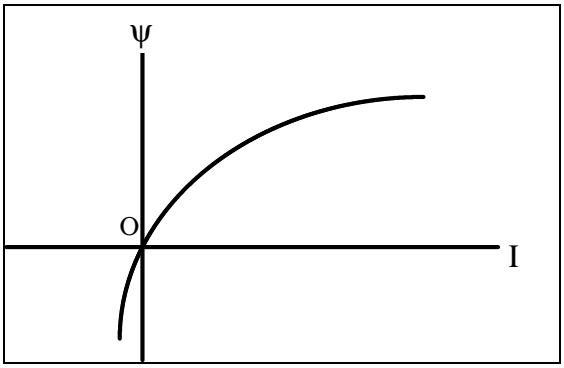


Figure 1.5 : Fonction d'installation du capital

D'après Hayashi, 1982. Cette fonction représente le capital réellement installé pour un investissement donné. Elle décroît rapidement lorsque I devient négatif, ce qui reflète l'irréversibilité de l'investissement: on récupère peu d'argent même en désinstallant beaucoup de capital. Formellement :

$$\dot{K} = \psi(I, K, t) - \delta K$$

capital, constitué d'hommes, de machines et de connaissances supplémentaires, a un coût. Une certaine partie de ce coût ne peut être récupéré en revendant le capital, comme par exemple les frais de recrutement et de formation du personnel, ou le temps passé à comparer les divers matériels. Dans l'autre sens, lorsque l'activité est à la baisse et que l'on souhaite diminuer les capacités, cela a aussi un coût que l'on peut illustrer par les frais associés aux licenciements, par les pertes consécutives à la revente du capital avant obsolescence, ou encore par la perte de savoir faire provenant de la dispersion des équipes.

Ces coûts d'ajustement mesurent la rigidité au changement, ils sont bien liés à la notion d'inertie et de flexibilité dont nous avons discuté plus haut. De plus, ils ne sont pas nécessairement les mêmes à la hausse et à la baisse: la notion n'est pas symétrique. Il s'agit donc d'un outil qui permet une approche graduée de l'irréversibilité. Hayashi[19] expose deux manières classiques de formaliser cet outil[a] :

1. Modifier l'équation classique de renouvellement du capital, en interprétant I comme un effort d'investissement brut, qui ne se transforme pas intégralement en nouveau capital : Seule une partie ψ de l'investissement brut I vient renouveler le stock de capital. On appelle ψ la fonction d'installation, elle est représentée Figure 1.5.
2. Soustraire à la fonction de production $F(K, N, t)$ une fonction de coût d'installation $G(I, K, t)$. Le stock de capital intervient parce qu'on suppose que le coût d'installation G dépend de la taille relative de I par rapport à K. La fonction G est croissante convexe, pour reflèter la supposition raisonnable des coûts d'installation marginaux croissants avec I.

Ces deux méthodes montrent que l'on dispose aujourd'hui d'outils théoriques, les coûts d'ajustements, qui permettent de représenter de façon graduée et asymétrique la flexibilité en économie. Nous examinerons l'importance de la prise en compte de ces coûts d'ajustement au chapitre 5, consacré à l'inertie des systèmes énergétiques et à la diminution des émissions de gaz à effet de serre.

Cependant, les aspects de l'irréversibilité que nous venons d'examiner n'épuisent pas l'importance de cette notion pour notre thèse. L'irréversibilité étant un effet qui se produit dans le long terme, elle ne saurait être dissociée de l'incertitude, ce que nous allons examiner maintenant.

2.4. Irréversibilité et incertitude

Les stratégies d'entreprise ne cherchent pas toujours à maximiser la flexibilité en minimisant les coûts d'ajustement. Les batailles menées par des firmes comme Microsoft ou Intel pour imposer des normes technologiques irréversibles sont des exemples du contraire. Dans un contexte de stratégie militaire, l'Encadré 1.3 décrit un autre cas historique montrant qu'il peut être judicieux de se lier les mains. Ces deux exemples démontrent que les aspects de l'irréversibilité décrits précédemment et pris en compte par les coûts d'ajustement sont loin de suffire à décrire l'ensemble du problème. En effet, ils omettent une dimension importante : les stratégies face à l'incertitude.

[a] K représente le capital, I l'investissement, N le travail, t le temps, δ le taux de dépréciation physique.

Nous avons posé plus haut que l'irréversibilité des choix concerne une situation de décision séquentielle, dans laquelle un premier choix influe sur les possibilités d'un second. Or nous allons voir dans cette section que tel est le cas pour le changement climatique. La situation ne se décrit pas simplement par un choix suivi d'un autre choix, mais typiquement par un choix suivi d'un événement extérieur suivi d'un autre choix. Non seulement il est toujours possible que des événements extérieurs interférent avec les choix du décideur puisque ceux ci sont séparés dans le temps. Mais de plus, on pose en général par définition que ce qui sépare les choix séquentiels c'est la survenue d'un événement extérieur.

Ces deux raisons expliquent pourquoi l'irréversibilité et l'incertitude vont de paire. Cette dernière notion est définie en référence aux situations de probabilités subjectives, appelées aussi situations d'incertitude, comme les courses de chevaux ou les systèmes chaotiques, que le cadre probabiliste classique décrit moins bien que les situations de probabilités objectives, comme les tirages dans une urne (probabilités logiques) ou les assurances (probabilités fréquentielles). A ce point, la notion de stratégie entre en jeu, puisque l'on est conduit à explorer les divers états du monde possibles pour rechercher une règle permettant de décider dans tous les cas. Dans le problème du changement climatique, l'incertitude concerne aussi bien la climatologie et l'écologie que l'économie et les sciences politiques. Toutefois, les modes d'Évolution de cette incertitude diffèrent notablement.

⇒ *Une diminution des incertitudes*

Concernant les sciences du climat en sciences du climat, deux mouvements de fond tendent à réduire l'incertitude, mais à ces mouvements se superpose la marche imprévisible de la science.

Le premier mouvement concerne les progrès des techniques d'observation et de calcul. Les séries temporelles concernant la distribution globale des paramètres géophysiques sont encore en cours de constitution. Et à ce jour, les climatologues ne disposent pas encore des moyens permettant de calculer certains aspects cruciaux du changement climatique comme la dynamique de la circulation thermohaline antarctique. Les modèles ne permettent pas non plus d'obtenir des résultats convaincants à l'échelle des pays. En effet, la résolution horizontale des modèles climatiques actuels en ce qui concerne l'atmosphère, varie[20] entre la grille R15 qui comporte 40 points en latitude et 48 en longitude, et la grille T42 qui comporte 64 par 128 points, ce qui ne permet pas de représenter un pays comme la France par plus de quelques points. Mais comme le rappelle Hasselmann[21], la résolution spatio-temporelle des modèles de circulation générale océan-atmosphère double lorsque la puissance des ordinateurs est multipliée par 16, ce qui ne demande que 6 ans environ si on admet que la puissance des puces électroniques double tous les 18 mois.

Le second mouvement de fond qui réduit l'incertitude sur le changement climatique est que le signal

Li Ch'unang dit :

Lorsque Han Hsin anéantit l'Etat de Chao, il partit de la Gorge du Puits avant le petit déjeuner. Il dit : " Nous allons anéantir l'armée Chao, puis nous nous retrouverons pour le repas. " Les généraux, qui étaient découragés, firent semblant d'être d'accord. Han Hsin rangea son armée en ligne de bataille, le dos au fleuve. En les observant du haut de leurs parapets, les troupes Chao éclatèrent d'un rire bruyant et se gaussèrent de lui en ses termes : "Le général des Han ne sait pas conduire une armée ! " Han Hsin procéda alors à l'écrasement de l'armée Chao et, après avoir pris son petit déjeuner, il fit décapiter le Seigneur Ch'eng An.

«Voici un exemple de ce qui échappe au commun des mortels»

Encadré 1.3 : Han Hsin brûle ses vaisseaux

Sun Tzu, L'art de la guerre, 4.8. Han Hsin, mort en 196 av. J.-C., est considéré comme l'un des deux plus grands généraux chinois de l'histoire. Commentaire:

Han Hsin plaça son armé en "terrain mortel". Il brûla ses bateaux et réduisit en miette ses ustensiles de cuisine. Le fleuve était derrière, l'armée Chao devant. Pour Han Hsin, il fallait vaincre ou se noyer.

commence à émerger du bruit qu'est la variabilité naturelle du climat, et qu'il en sera de plus en plus ainsi à l'avenir. Les observations sur les réactions des écosystèmes et des agrosystèmes aux perturbations climatiques s'accumulent avec le passage des années, de même que le savoir faire des techniques d'évaluation mises en oeuvre par les équipes interdisciplinaires.

Ces deux mouvements contribuent à expliquer pourquoi la connaissance scientifique sur le changement climatique progresse à un rythme soutenu. Actuellement, les chercheurs disposent de modèles reproduisant bien la dynamique de l'atmosphère ou des océans, et les modèles couplés s'améliorent constamment. Au total, au cours des cinq années 1990-1995, le message transmis la communauté scientifique à travers le groupe de travail I du GIEC à évolué d'une position de prudence « on ne pouvait pas être certain de l'existence de la perturbation » à une situation de conviction « on peut discerner une influence anthropique sur le climat ».

Cette Évolution du message correspond à la réduction de l'incertitude sur la détection du changement climatique. Cette question de la détection est certes importante. Mais Hasselman (op. cit.) rappelle qu'il serait dommage qu'elle attire toute l'attention et fasse perdre de vue les problèmes plus préoccupants de l'Évolution à long terme du climat. De ce côté, notons que la fourchette d'incertitude sur le paramètre de sensibilité de la température moyenne globale à un doublement de la concentration de CO_2 ne s'est pas réduite depuis le premier rapport du GIEC, elle reste de 1.5 à 4.5 degrés Celsius. Les incertitudes sur la possibilité d'un changement de mode de la circulation thermohaline dans l'Atlantique Nord semblent avoir augmenté, puisque événement ne semble plus aussi exclu qu'auparavant[22].

⇒ *Incertitudes et effets socio-économiques*

Les incertitudes sur l'Évolution du climat doivent ensuite être multipliées par les incertitudes:incertitude sur les Évolutions des écosystèmes. Le point le plus critique est peut être d'évaluer l'effet du changement climatique sur les rendements agricoles. Or, actuellement et malgré plusieurs années d'efforts internationaux, on peut seulement conclure que « le rendement du blé en Europe pourrait augmenter ou diminuer ». Le Tableau 1.5 montre que la prévisibilité n'est pas meilleure pour les autres récoltes ou dans d'autres régions du monde. Au delà des rendements agricoles, la littérature aboutit à des estimations très diverses du coût social total de l'Évolution du climat. L'IPCC reconnaît que:

> *« De telles estimations comportent une incertitude considérable, mais la littérature ne permet pas de déterminer l'ampleur de cette incertitude. Il est impossible de considérer la fourchette des estimations comme une barre d'erreur, étant donné les hypothèses et les méthodologies très diverses adoptées pour les différentes études ».*

Région	Culture	Effet sur le Rendement (%)	Commentaires
Latin America	Maize	-61 to increase	Data are from Argentina, Brazil, Chile, and Mexico; range is across GCM scenarios, with and without CO_2 effect
	Wheat	-50 to -5	Data are from Argentina, Uruguay, and Brazil; range is across GCM scenarios, with and without CO_2 effect
	Soybean	-10 to +40	Data are from Brazil; range is across GCM scenarios, with CO_2 effect
Former Soviet Union	Wheat	-19 to +41	Range is across GCM scenarios and region, with CO_2 effect
	Grain	-14 to +13	
Europe	Maize	-30 to increase	Data are from France, Spain, and northern Europe; with adaptation and CO_2 effect; assumes longer season, irrigation efficiency loss, and northward shift
	Wheat	increase or decrease	Data are from France, UK, and northern Europe; with adaptation and CO_2 effect; assumes longer season, northward shift, increased pest damage, and lower risk of crop failure
	Vegetables	increase	Data are from UK and northern Europe; assumes pest damage increased and lower risk of crop failure
North America	Maize	-55 to +62	Data are from USA and Canada; range is across GCM scenarios and sites, with/without adaptation and with/without CO_2 effect
	Wheat	-100 to +234	
	Soybean	-96 to +58	Data are from USA; less severe or increase with CO_2 and adaptation
Africa	Maize	-65 to +6	Data are from Egypt, Kenya, South Africa, and Zimbabwe; range is over studies and climate scenarios, with CO_2 effect
	Millet	-79 to -63	Data are from Senegal; carrying capacity fell 11-38%
	Biomass	Decrease	Data are from South Africa; agrozone shifts

Tableau 1.5 : Incertitude sur l'Évolution des rendements agricoles.

Sélection de résultats concernant l'effet sur certaines récoltes d'un doublement de la concentration équivalente de CO_2. Source : Rapport IPCC 1995, Working group II, Summary for PolicyMakers.

⇒ *Une surprise scientifique reste possible*

A toutes ces incertitudes doivent s'ajouter les risques de surprises scientifiques compte tenu de la non-linéarité du système couplé océan-atmosphère-cryosphère-biosphère. L'exemple du trou dans la couche d'ozone illustre l'accélération possible des politiques suite à une surprise scientifique majeure concernant l'irréversibilité environnementale.

L'article de Rowland et Molina sur les effets des CFC est paru en 1974. Durant cette décennie, seuls quelques pays avaient proscrit l'usage des CFC, surtout dans les bombes aérosols. C'est en 1985 seulement que la découverte du trou d'ozone accéléra l'aboutissement de la conférence de Vienne la même année. Puis le protocole de Montréal, signé en 1987, amendé à Londres en 1990, puis à Copenhague en 1992, a conduit à la suppression totale des CFC. Si la production avait été diminuée de 50% dès 1978, puis à nouveau de 50% en 1985 pour se poursuivre indéfiniment à 200 000 tonnes par an, cela aurait stabilisé la concentration de chlore dans la stratosphère à 1.9 milliardième. Comme le remarque Mégie[23] :

Le seuil de 2 milliardièmes n'ayant pas été dépassé, les scientifiques n'auront pas découvert toute

l'importance des processus de chimie hétérogène, et resteront persuadés que les équilibres mis en évidence dans les années 1970 suffisent à expliquer l'équilibre de la couche d'ozone stratosphérique. La catastrophe écologique du trou d'ozone antarctique est très probablement évitée.

⇒ *Incertitudes et décisions*

Cette remarque pose cependant une question supplémentaire en montrant que l'arrivée ou non d'informations à moyen terme peut dépendre des actions entreprises, et donc des choix à court terme. Notons que l'idée selon laquelle seule une concentration de gaz à effet de serre élevée pourrait motiver une réforme internationale coordonnée des systèmes énergétiques, peut conduire à une position paradoxale qui impliquerait de polluer beaucoup à court terme pour déclencher l'action protectrice à court terme !

Les relations entre incertitude et décision sont importantes. Comme le montre Hourcade[24], pour représenter la dynamique à long terme du progrès technique induit il peut être important de prendre en compte les rétroaction entre les choix et les anticipations, un point développé plus généralement dans Azariadis et Guesnerie[25], par exemple.

Mais nous n'explorons pas en profondeur dans cette thèse les relations entre les anticipations des agents, leurs choix et les divers flux d'information, car cela nous semble relever davantage de l'étude de l'incertitude que de l'irréversibilité. Nous évitons ainsi la difficile modélisation des conditions de production de l'invention et de la connaissance scientifique.

Nous nous bornerons à étudier les effets sur les politiques d'émission de $_{CO2}$ de l'irréversibilité alliée à une incertitude 'exogène'. En effet, les conséquences des perspectives de réduction des incertitudes sont encore discutées. Certaines parties du débat sur le changement climatique comme la Global Carbon Coalition soutiennent qu'il est urgent d'attendre le progrès scientifique avant d'agir. A un niveau plus sophistiqué, certains des modèles que nous étudierons au chapitre 4 indiquent que l'effet de l'irréversibilité va aussi dans cette direction. Nous nous proposerons de remettre en cause ce type de résultats aux chapitres 6 et 7.

2.5. Conclusion: irréversibilités et changement climatique

Nous conclurons concrètement cette problématique en dressant une liste en cinq points des aspects de l'irréversibilité dans le changement climatique. Précisons tout d'abord deux points préliminaires.

- Nous nous plaçons à l'échelle de temps de l'action de la société humaine dans son ensemble, la décennie. Par exemple, à l'échelle de la dynamique climatique, un éventuel affaiblissement de la dérive Nord Atlantique pourrait n'être que transitoire, pour quelques siècles. Par rapport au temps de la décision, celui qui compte, le problème peut donc être considéré comme irréversible[a].
- La réduction des émissions atmosphériques polluantes est un effort dont l'intensité peut varier continûment. Mais pour la commodité de l'exposé, nous nous placerons souvent dans une perspective manichéenne qui n'envisagerait que deux alternatives, l'inaction d'une part (pas de politiques spéciales contre le changement climatique), et un effort intense d'autre part (des objectifs de réduction d'émission ambitieux et contraignants à court terme).

Tenir compte de l'irréversibilité dans l'évaluation du changement global implique de considérer au moins les phénomènes suivants :

[a] Cette précision nous a paru nécessaire compte tenu du caractère parfois polémique des débats autour de la question étudié. D'un certain point de vue, tout est réversible, même une fracture du bras : tout dépend de l'échelle de temps considérée.

a) La dynamique du climat. L'épuration de l'atmosphère par les océans n'est ni rapide, ni totale. Concernant le dioxyde de carbone, par exemple, sa vitesse d'absorption globale est limitée par le mélange des eaux océaniques superficielles avec les eaux profondes. De plus, l'augmentation de sa pression partielle dans les océans implique une augmentation de la concentration d'équilibre. A long terme, de l'ordre de 13% du carbone émis reste dans l'atmosphère, cette fraction étant encore supérieure à 30% après 50 ans[26]. D'autre part, certains facteurs climatiques pourraient ne pas revenir à leur état actuel après un épisode de réchauffement éventuel. Il en est ainsi par exemple de la calotte glaciaire du Groenland, car celle ci est formée par l'accumulation des neiges tombées au cours de la dernière glaciation[27]. Précisons toutefois qu'à l'échelle du prochain siècle, la dislocation des glaces groenlandaises et ouest-antarctique ne semble pas prévisible. Un troisième exemple de non-réversibilité dans le système climatique est l'existence de plusieurs modes de circulation océanique. En particulier, il semble démontré[28] qu'au cours de certains épisodes climatiques, la circulation dans l'Atlantique Nord était moins intense qu'actuellement..

b) Polluer plus tôt permettrait au total de polluer plus[29]. En effet, à l'horizon 2100 par exemple, les gaz émis en 1996 auront été exposés pendant 104 ans aux puits naturels de carbone, alors que ceux émis en 2099 ne l'auront pas été. En agissant aujourd'hui, on abandonne donc un « supplément gratuit » de pollution qu'on aurait pu se permettre pour le même résultat final. Bien que cette affirmation suppose une certaine stationnarité de la dynamique climatique dont on ne peut pas être certain, et qu'il ne soit pas prouvé que l'ordre de grandeur du gain qu'elle procure soit significatif, cet effet sera pleinement pris en compte dans cette thèse, car nous utiliserons un modèle linéaire du cycle du carbone.

c) L'irréversibilité des investissements. La date optimale pour réaliser un investissement irrécupérable dans un contexte d'apprentissage est retardée à cause de l'effet d'irréversibilité. Les mesures de restriction des émissions polluantes entraînent des investissement par les agents économiques. Trois exemples sont la mise en place de nouveaux processus de production, des réorganisations logistiques générales, ou encore des rénovations immobilières. Tous ces investissements sont irrécupérables. En effet, en première approximation leur rentabilité est déterminée par des mesures générales, et lorsque les conditions changent dans tout un secteur industriel, les équipements deviennent obsolètes ou non rentables également pour tous les acteurs. A un niveau plus élevé, on trouve les irréversibilités sociales et politiques, celles qui coordonnent les anticipations des acteurs vers un futur possible et de ce fait assurent les conditions de sa réalisation. Cela signifie qu'on ne revient pas en arrière sur les acquis environnementaux. Il faut donc tenir compte du risque de prendre trop tôt des mesures trop fortes.

d) Mais une source d'irréversibilité opposée est induite par la lenteur de renouvellement du stock de capital et d'institutions. Dans certains secteurs de l'économie comme la production d'électricité, les infrastructures de transports et l'habitat, on ne peut pas envisager des changements importants en moins d'une génération sauf à consentir des sacrifices énormes. Ne pas infléchir dès aujourd'hui les choix dans ces secteurs pour réduire les émissions, c'est continuer à se lier pour des dizaines d'années à des installations et des infrastructures génératrices de pollution. Les coûts d'ajustement pour réduire les émissions, sont d'autant plus élevés qu'on envisage de le faire rapidement. Il faut donc tenir compte du risque de ne pas pouvoir agir à temps.

e) En plus du capital matériel et des institutions, on doit tenir compte de la dynamique du changement technique induit. Plus précisément, on peut penser que seule une action précoce pour réduire les émissions polluantes va mettre en branle le processus de recherche et développement nécessaire à la création des technologies propres souhaitées. Ces innovations, en réduisant les coûts des solutions alternatives écologiques, vont permettre d'agir encore plus loin. A l'horizon d'une décennie, la palette des choix techniques envisageables pour diminuer les émissions sera bien plus développée si l'on s'est déjà engagé.

Nous récapitulons ces cinq formes d'irréversibilité dans le Tableau 1.6 et notre problématique Encadré 1.4. On ne peut pas dire a priori si la non flexibilité est un argument pour lutter dès aujourd'hui contre la pollution. Seule une approche empirique semble capable de mettre en balance les cinq cases du Tableau 1.6.

Pousse à attendre	Pousse à agir
Précautions excessives.	Changer devient plus difficile.
Perte du « supplément gratuit » de pollution.	Accumulation des polluants.
	Retard des technologies propres

Tableau 1.6 : Les irréversibilités dans le changement climatique.

Comme nous le montrerons au chapitre théorique 5, compte tenu des incertitudes énormes quand à l'Évolution du changement climatique, il convient de favoriser les réponses les plus flexibles. Le problème est qu'il y a des irréversibilités qui poussent à agir tôt contre la pollution et des irréversibilités qui poussent à attendre davantage d'information.

Comment tenir compte de l'irréversibilité dans l'évaluation du changement climatique ?

La question pratique posée est politique :

Jusqu-où vaut-il mieux investir aujourd'hui dans la réduction des émissions polluantes, ou attendre ?

Cette question, nous l'abordons sous l'angle de l'évaluation de l'irréversibilité :

Puisqu'on va de mieux en mieux connaître le fonctionnement du climat, les mesures que l'on prend aujourd'hui doivent être flexibles.

La question est non triviale car l'irréversibilité pèse des deux côtés de la balance :

Investir aujourd'hui est irréversible. Les dépenses consenties ne seront pas récupérables si elles s'avèrent excessives.

Attendre est aussi irréversible. Les gaz à effet de serre s'accumulent dans l'atmosphère (Vie du CO_2 dans l'atmosphère, 120 ans). A court terme (15-40 ans), les équipements et les institutions en place tendent à le rester : attendre augmente les difficultés d'un changement rapide. On prend du retard dans le développement des technologies propres.

Notre approche vise à comparer ces deux irréversibilités :

DANS LES MODÈLES INTÉGRÉS DU CHANGEMENT CLIMATIQUE, IL FAUDRAIT PRENDRE EN COMPTE LA VALEUR ESPÉRÉE DE L'INFORMATION FUTURE, QUI MESURE LA FLEXIBILITÉ DES CHOIX. CETTE VALEUR DÉPEND DES CONDITIONS D'AJUSTEMENT DES SYSTÈMES ÉNERGÉTIQUES ET DU PROGRÈS TECHNIQUE.

Termes actuels de la comparaison dans la littérature (Kolstad, 1994) :

« *..., it appears that the control capital irreversibility exists and is substantial whereas the environmental irreversibility does not exist or at least has no effect on current policy decisions.* »

Mots clés:

L'aspect étudié est aussi appelé « l'effet d'irréversibilité », « la valeur d'option », dite « option réelle » par opposition aux options financières, ou encore « la valeur de quasi option ».

Cette valeur de (quasi) option découle de l'existence d'une « valeur de l'information future », valeur qui dépend des choix présents. Le concept est donc lié à celui de la valeur de l'information.

Aspects connexes mais distincts :

La valeur de l'information présente, appelée « valeur espérée de l'information parfaite » (EVPI), qui représente ce que l'on gagnerait si la connaissance exacte et totale du problème était apportée aujourd'hui.

L'« aversion au risque » représente la préférence pour la certitude.

L'irréversibilité dans la négociation entre les pays.

Encadré 1.4 : Fiche récapitulative : problématique

3. Méthode: l'analyse intégrée du changement climatique

La personne nous ayant exprimé sa position suivante:

"Je ne suis pas la littérature scientifique. De quoi parlent ces Wigley, Richels et Edmonds ?"[a]

est un fonctionnaire européen haut placé dans la négociation diplomatique suivant la Convention-Cadre des Nations Unies sur le Changement du Climat. Le type de travail accompli dans cette thèse peut-il avoir une utilité au delà du cercle restreint des spécialistes ? Comme il n'y a aucun doute sur le caractère sérieux de la question, peut-être est-ce du côté de la méthodologie que se trouve un problème ? Dans ce paragraphe, nous allons donc commencer par expliquer la nature de cette méthodologie que l'on appelle la modélisation intégrée du changement climatique. Ensuite, nous verrons que, malgré les problèmes spécifiques qu'elle engendre, la modélisation intégrée est non seulement utile mais nécessaire.

3.1. Qu'est ce qu'un modèle d'évaluation intégrée du changement climatique ?

Rappelons que le mot "évaluation intégrée" veut dire que *nous associons des connaissances provenant d'un grand nombre de disciplines pour donner des éclairages qu'il ne serait pas possible d'obtenir par la recherche disciplinaire traditionnelle* (IPCC 1995). On peut dire que, d'une façon ou d'une autre, les décideurs font de l'évaluation intégrée lorsqu'ils combinent mentalement les divers points de vue qu'ils ont pu obtenir sur un problème.

On appelle Modèle d'Evaluation Intégrée, et en anglais Integrated Assessment Model (IAM) un modèle qui combine des connaissances d'un vaste éventail de disciplines pour fournir des éclairages qu'il ne serait pas possible d'observer par la recherche disciplinaire traditionnelle[30]. Ces modèles sont utilisés pour explorer les états possibles des systèmes humains et naturels ; analyser des questions clés reliées à la formulation des politique ; et aider à fixer les priorités de la recherche. Il serait à peu près équivalent de parler de "modèles interdisciplinaires appliqués".

Dans le contexte de la recherche environnementale, le mot modèle suppose en plus une méthodologie formalisée, pour combiner ces connaissances en un même lieu logique. Un modèle d'évaluation intégrée est donc un logiciel, ou un ensemble de logiciels plus ou moins fortement couplés, et non simplement un modèle conceptuel.

Les ambitions du champ d'activité défini ci-dessus sont assez vastes. Mais la modélisation n'est qu'une façon particulière de faire de l'évaluation intégrée. Son champ est par nature restreint aux problèmes qui se prêtent au calcul. On ne peut donc pas penser a priori que tout problème d'environnement peut être analysé par un modèle. On peut même penser le contraire, que tout problème d'environnement contient des éléments peu aptes à la modélisation.

Cependant, il est aisé de se rendre compte de l'intérêt et de l'impact que peuvent avoir eu les modèles intégrés, ne serait ce qu'en citant les trois modèles suivants[31] :

- World3, de Forrester, développé au MIT, modélise le fonctionnement du monde en couplant les systèmes sociaux et naturels majeurs. Avec ce modèle, décrit dans *Limits to Growth*[32], les auteurs introduisent dans le débat politique des concepts nouveaux comme 'rétroactions', 'overshoot', et 'limites de ressources'. C'est le premier modèle global à grand succès.
- L'ensemble des modèles couplés de l'International Institute of Applied System Analysis (IIASA), décrits dans le livre 'Energy in a finite world'[33], représente aussi un modèle du monde, en mettant l'accent sur les marchés de l'énergie. Selon Alcamo, ce travail marque les politiques pendant les chocs pétroliers. Mais il représente aussi la fin de la première vague des modèles globaux, qui

[a] Sans doute l'article le plus influent de l'année 1996 concernant les choix économiques et les réductions d'émissions de gaz à effet de serre, paru dans *Nature*.

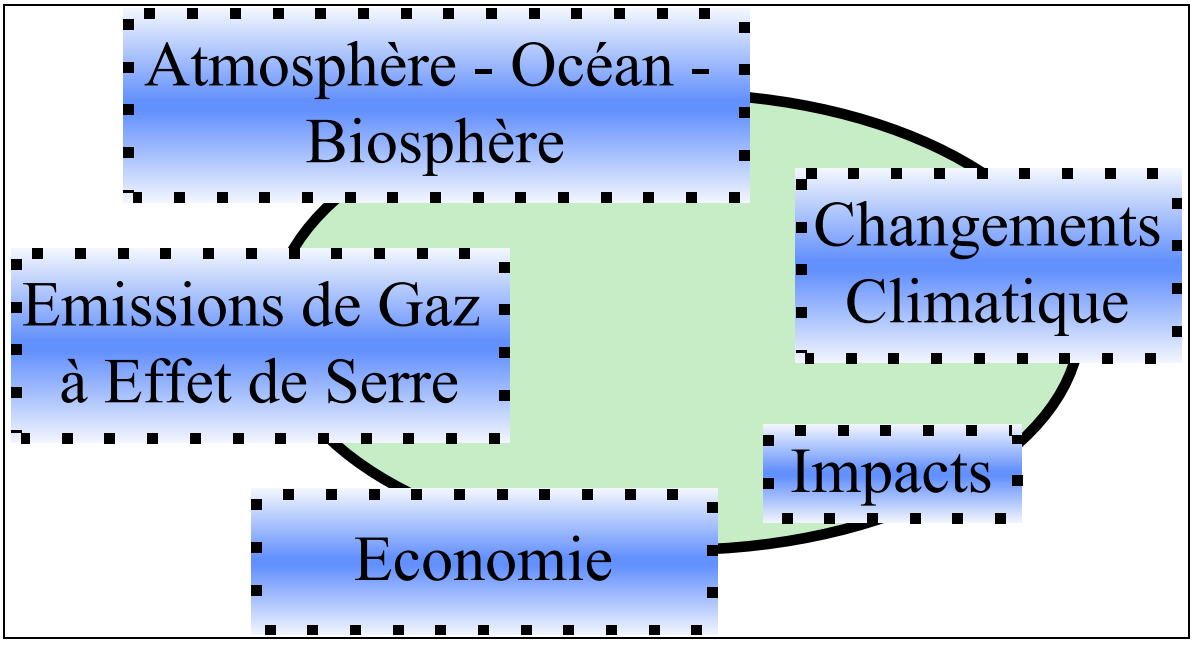


Figure 1.6 : Aspects de l'évaluation intégrée du changement climatique

n'ont pas réussi à s'imposer comme des outils scientifiques incontestés.

- Le modèle RAINS, plus récent et développé aussi à l'IIASA, analyse à l'échelle européenne le phénomène de l'acidification. Il représente un grand succès comme produit d'aide à la décision politique, puisqu'il a été utilisé pour développer les plans européens de réduction des émissions soufrées[34].

Les trois exemples précédents ne sont pas spécifiques du changement climatique, ni même de l'économie de l'environnement. Ceux-ci sont apparus plus tard, lorsque le problème est devenu plus important sur l'agenda international. Parmi les précurseurs, nous citerons DICE[35] et IMAGE 1[36], dont nous parlerons plus en détail au chapitre 4. Il apparaît bien que la modélisation intégrée ne se limite pas au changement climatique, mais dans le contexte de cette thèse nous sous-entendrons "du changement climatique" après "modèle intégré".

Comme le verrons plus loin dans cette thèse, la tradition de modélisation en sciences naturelles est assez différente de celle des sciences sociales. Dans cette introduction, il nous a semblé nécessaire d'examiner une critique possible concernant la scientificité des modèles à très long terme.

3.2. Nécessité des modèles intégrés

Ce n'est pas seulement à cause de sa nouveauté et de sa technicité que l'évaluation intégrée a du mal à être perçue par les politiques. Tout discours prétendant éclairer le long terme, s'attire une suspicion en vertu de ce qu'on pourrait appeler le syndrôme de Nostradamus. Utiliser un modèle quantitatif pour examiner un problème de très long terme en économie, est-il une approche scientifique légitime ?

Une caractéristique nécessaire des assertions scientifiques est que l'on peut montrer qu'elles sont fausses. Effectivement, le contrôle scientifique des modèles intégrés du changement climatique pose un problème. Leurs résultats ne peuvent être comparés qu'entre eux et non avec la réalité future. Toutefois, cette situation est la plus courante en économie.

Dans notre cas particulier, nous pouvons aussi insister sur le fait que les modèles ne font que construire des scénarios cohérents, et en aucun cas à faire des prévisions. Il est alors tout à fait possible de montrer que tel ou tel modèle contient des contradictions internes ou des aspects ne correspondant pas à la réalité passée ou présente.

Certains modèles intégrés sont trop compliqués pour pouvoir être utilisés hors de leur laboratoire

d'origine. Or, en interne, un modélisateur dispose d'une marge de manoeuvre incontrôlée pour faire dire à son programme ce qu'il veut. Il nous semble donc que, dans notre discipline comme dans les autres, la reproductibilité des résultats par des équipes indépendantes est un critère fondamental de scientificité. En conséquence, nous pensons que les équipes dont les modèles sont trop opaques devraient faire un effort supplémentaire. Lorsque plusieurs modèles sont couplés en reportant les résultats à la main de l'un à l'autre et en itérant, cela devrait par exemple se faire selon une procédure bien définie. Et bien sûr, le code source de tous les modèles devrait être public.

Il existe un grand danger d'utilisation non scientifique des modèles. Compte tenu de leur nature, on peut habituellement craindre que les médias déforment, amplifient et amputent les assertions soutenues par les modèles, en se concentrant par exemple sur tel ou tel chiffre spectaculaire. A notre avis ce n'est pas une raison suffisante pour restreindre la diffusion du code et des résultats. En effet, nous pensons que face à des attitudes moins sérieuses ou plus partiales qui recherchent la publicité, le seul choix de la communauté scientifique est la transparence. La mission d'explication du contenu et de la portée des modèles n'est possible que si les modèles sont eux-mêmes compréhensibles par les scientifiques.

La portée de beaucoup de modèles se limite à expliquer un point précis, par opposition à d'autres qui ont une approche globale du fonctionnement de l'économie et du climat, voire du monde en général. Les deux objectifs peuvent être poursuivis scientifiquement, mais les exercices de prospective holistiques sont à prendre avec encore plus de recul. Au contraire, un travail dont le champ de validité est bien borné est plus facile à comprendre et à discuter.

Résumons les quatre points précédents : A notre avis, un modèle intégré d'un problème à long terme, lorsqu'il est bien délimité, transparent, reproductible et ne prétend pas à la prédiction mais à être cohérent avec lui même et avec la réalité, peut être qualifié de travail scientifique.

Sous ces conditions, une approche formalisée, qui traduit des équations mathématiques portant sur des données numériques dans un programme, présente certains avantages. Ces avantages sont à comparer à ceux des autres façons de présenter les choses, comme par exemple le discours sans équations explicites.

L'approche formelle est plus concise : en une page d'équations, on peut synthétiser un livre entier. De ce fait, elle présente une vue plus synthétique des choses, donc plus facile à appréhender dans leur ensemble. En contrepartie, cette vue est plus superficielle et risque de conduire à la pensée automatique. C'est pourquoi la valeur d'un modèle simple, comme DICE, ne peut vraiment se réaliser que lorsque toutes les relations et tous les paramètres sont discutés et justifiés complètement, comme dans Nordhaus[37].

L'approche formelle est plus précise, elle permet de comparer des effets opposés pour savoir lequel l'emporte. Toutefois, compte tenu de l'importance de l'incertitude, c'est aussi un désavantage. La représentation de l'ignorance dans les modèles reste imparfaite, et le calcul des probabilités pose des problèmes pratiques et théoriques. Cette précision, qui permet d'exploiter le pouvoir des nombres pour convaincre, est donc à considérer avec prudence. Mais la précision reste un avantage lorsqu'il ne s'agit plus de convaincre mais simplement de transmettre les idées, puisque les mathématiques sont un langage universel. En particulier, c'est le langage des sciences, et par exemple le plus grand point commun entre la climatologie et l'économie.

L'économie, comme les autres sciences, est aussi une pratique sociale. Les modèles formels ont actuellement une place importante dans cette pratique. Nous pensons que cette place ne devrait pas être la première, mais la dernière. C'est à dire que les idées que nous allons exposer, nous tenterons de les présenter trois fois : la première, à l'aide d'explications simples ; la seconde, avec des exemples concrets ; et seulement enfin, avec un modèle formel. Cependant, l'accès aisé à des moyens de calcul numérique et formel relativement élevés distingue la dernière génération d'économistes par rapport à toutes celles qui l'ont précédé. C'est pourquoi il nous a semblé utile, à titre personnel, de maîtriser ces outils au mieux.

Mais en passant plus de temps à penser aux problèmes algorithmiques et mathématiques, on en passe

moins à réfléchir à la réalité économique. Cette observation n'est pas trop gênante, il suffit de se donner plus de temps au total. Au fond, il est incontournable qu'il faut passer plus de temps pour traiter un problème avec rigueur formelle que pour avoir de brillantes intuitions. Par contre, l'avantage du formalisme est que l'on peut calculer, c'est à dire transformer des expressions en des expressions équivalentes selon des règles. La conclusion d'un calcul contient la même vérité que les hypothèses. Mais ce qui est intéressant, c'est que la conclusion se présente sous une forme différente, et cela fournit parfois des éclairages économiques nouveaux auxquels on n'aurait pas pensé autrement. En ce sens, l'approche mathématique peut être créatrice en économie.

En conclusion, nous avons vu que non seulement les modèles formels sont une approche réellement scientifique, mais qu'ils sont utiles pour rapprocher beaucoup de résultats provenants de disciplines aux langages a priori différents. C'est une pratique sociale acceptée, qui peut être créatrice parfois, qui est aussi utile pour convaincre, mais qu'il convient d'utiliser avec précaution.

3.3. Conclusion : un champ de recherche en développement

Dans cette section, nous avons tenté d'expliquer quelques caractéristiques générales des modèles d'évaluation intégrée du changement climatique. Ces modèles sont récents, ils s'attaquent à un problème difficile, et les scientifiques sont encore relativement divisés quant à la manière d'aborder le sujet. Tout ceci fait que les politiques chargés de négocier des instruments d'action concrêts peuvent percevoir ces modèles comme d'une utilité faible.

Mais cette division, cette jeunesse et cette ambition sont aussi la marque d'un champ de recherche en plein développement. Le problème étudié étant là pour durer, on peut comprendre qu'il soit plus important de mener des analyses fondamentales que de chercher à produire des outils immédiatement utilisables, mais faux ou sans descendance.

4. Ligne directrice de notre travail

Les résolutions politiques concernant les problèmes d'environnement global sont très marqués par le souci de l'irréversibilité. Cet aspect nous semble insuffisamment relayé dans les modèles d'évaluation intégrés de ces problèmes.

Cette thèse a donc pour but de rapprocher, sur le problème du changement climatique (appelé aussi réchauffement global, ou encore effet de serre), les théories concernées par l'irréversibilité des pratiques de modélisation intégrée. Pour cela, nous avons effectivement construit un modèle intégré, DIAM, dont les détails techniques sont présentés en annexe. La thèse est articulée en trois parties. Dans la première, nous tentons de présenter et de relire les discussions scientifiques actuelles afin de montrer comment l'irréversibilité s'insère naturellement comme concept-clé du débat sur l'action contre le changement climatique. Dans la seconde, nous donnons deux éclairages sur deux concepts importants mais peu utilisés jusqu'à présent dans la littérature, l'effet d'irréversibilité et les coûts d'ajustement. Dans la dernière partie, nous tentons de prendre en compte ces concepts, de deux façons différentes mais au fond équivalentes.

4.1. Organisation du document

Les deux chapitres suivants posent le problème de façon plus détaillée que dans cette introduction. Nous commencerons par un point de vue général, au chapitre 2, en rappelant les conditions géophysiques et économiques du problème du changement climatique. Nous aurons une perspective plus historique au chapitre 3. Partant de l'exposé des mécanismes institutionnels mis en place pour assurer la collaboration internationale, nous examinerons ensuite l'histoire du débat sur un plan scientifique. Ces deux chapitres nous permettrons d'exposer en quoi le changement climatique est un problème réel et sérieux, caractérisé par le risque de surprises et d'irréversibilités, et en quoi, d'un autre coté, la réaction de la société humaine présente aussi des risques d'irréversibilité technique et une grande inertie.

Le but du chapitre 4 sera d'examiner comment les modèles existants prennent en compte le jeu entre

l'incertitude, l'inertie et le progrès technique induit. Nous examinerons notamment le modèle DICE, de W.D. Nordhaus, qui est un précurseur de la modélisation intégrée dans un contexte de croissance optimale. Nous verrons aussi les travaux de Kolstad et ceux Ulph et Ulph, dont les nôtres se rapprochent notablement, ainsi que ceux de Manne et Richels, qui sont une référence sur le problème de l'incertitude dans le changement climatique. L'examen d'autres travaux encore nous permettra de conclure sur le fait que ces modèles n'offrent pas un traitement équilibré des irréversibilités de l'économie et du système climatique.

Dans le chapitre 5, nous présenterons un modèle d'évaluation intégrée particulièrement compact, DIAM. Nous défendrons l'idée que les modèles actuels surestiment les coûts de réduction des émissions à long terme et sous-estiment les coûts d'ajustement à court terme. Mieux cerner ces problèmes ouvre des perspectives différentes à l'analyse coût-bénéfice du problème du changement climatique. Le progrès technologique induit, en diminuant les coûts de dépollution à long terme, rend possible un objectif environnemental ambitieux.

Au chapitre 6, nous appliquons DIAM sous incertitude. Le chapitre s'appuie sur un article de Ha Duong, Grubb et Hourcade paru dans *Nature*[38] en réponse à Wigley, Richels et Edmonds[39]. Nos résultats tendent à montrer que tenir compte de l'inertie et de l'incertitude justifie une diminution précoce des émissions. Ils permettent de relativiser l'importance de la question des préférences intertemporelles devant les problèmes soulevés par l'incertitude et l'irréversibilité.

Nous introduisons un calcul explicite de la valeur d'option au chapitre 7, basé sur un article à paraître dans *Energy Economics*. Nous examinons les théories de l'effet d'irréversibilité et de la valeur de quasi option, dans un contexte de choix séparables. Nous mettons en avant les liens entre la valeur de quasi option et les variations de la valeur espérée de l'information future. Nous replaçons le problème du changement climatique dans un contexte des choix discrets, pour calculer explicitement une valeur d'option.

Ainsi, nous répondons d'une façon quantitative à la question "Comment tenir compte de l'irréversibilité dans l'évaluation du changement climatique". Il apparaît que cette valeur d'option de réduire tôt les émissions a un signe positif pour la majorité des jeux de paramètres que nous avons exploré. Dans tous les cas, cette valeur d'option est significative en valeur absolue devant les coûts et les bénéfices mis en jeu. Cela permet de montrer l'importance de la flexibilité parmi les objectifs des politiques de lutte contre le changement climatique.

4.2. Organisation des annexes décrivant le modèle DIAM

L'annexe technique A présente le calcul de l'effet d'irréversibilité. Ce calcul est automatisé bien qu'il soit sans difficulté technique, en effet il y a 16 cas à discuter. Les trois autres annexes sont consacrées au modèle DIAM.

DIAM est un modèle intégré d'optimisation intertemporelle. La partie économique est traitée en équilibre partiel. C'est un modèle très stylisé du problème du changement global. Il met en avant le problème de la répartition des coûts de réduction entre coûts d'ajustement et coûts de long terme. Grâce à sa simplicité, c'est un modèle reproductible. Il a eu un impact réel auprès d'une certaine communauté scientifique concernée par la modélisation intégrée.

Bien que les ordres de grandeurs numériques puissent sembler raisonnables, il convient de tirer les conclusions politiques avec beaucoup de précautions. En effet, deux facteurs importants ont été complètement omis. L'aversion au risque n'est pas représentée dans DIAM. De plus, ce modèle ne fait pas la distinction entre les pays industrialisés et les autres.

Dans l'annexe B, nous démonstrons mathématiquement, qu'il existe une solution et une seule au problème d'optimisation que pose DIAM. Puis nous expliquerons comment nous formons le problème déterministe équivalent au problème en programmation dynamique avec contrainte stochastique. Nous ne poussons pas plus en avant l'exploration analytique des équations, puisque notre but premier est de faire de l'économie et non des mathématiques.

Nous donnerons ensuite le code de deux implémentations du modèle : dans le langage GAMS annexe D, dans le langage *Mathematica* annexe C. Ce dernier comprend également les tables de résultat détaillées, ainsi que des graphiques additionnels qui n'ont pas trouvé leur place dans le texte.

Références Bibliographiques

[1] IPCC Working Group III, *Résumé à l'intention des décideurs :aspects socio-économiques de l'Évolution du climat*, paragraphe 10, 1996.

[2] Jacques Grinvald, *De Carnot à Gaïa: Histoire de l'Effet de Serre*, La Recherche, 243, 532-538, mai 1992. Numéro Spécial sur l'Effet de Serre.

[3] Svante Arrhenius, *On the Influence of Carbonic Acid in the Air upon the Temperature of the Ground,* Philosophical Magazine 41, 237 (1896). En ligne comme partie de Carmen Giunta's Classic Chemistry Page, à Le Moyne College Department of Chemistry, http://web.lemoyne.edu/~giunta/index.html, accès 7/1/98.

[4] Commission Mondiale sur l'Environnement et le Développement, *Notre Avenir à Tous*, dit *Rapport Bruntland*, page 10, Les Éditions du Fleuve, Montréal, Québec, Canada, 432 pages, décembre 1989. Publié originellement en langue anglaise par Oxford University Press sous le titre *Our Common Future*, 1987.

[5]Académie des Sciences, *L'Effet de Serre et ses Conséquences Climatiques. Evaluations Scientifiques*, Rapport du Comité de l'Environnement N°25, CADAS, Paris, oct 1990.

[6] Jean-Pierre Clapin, *Effet de Serre et Prospective Industrielle Française*, Avis et rapports du Conseil économique & social N° 15, NOR : CESX9700115 V, JORF du Lundi 20 octobre 1997.

[7] FNCC/NC/11 du 21 Novembre 1995

[8] WRI 1994-95 p 202 table 11.7

[9] P. Roqueplo, *Pluies acides: menaces pour l'Europe*, Economica, CPE, Paris, 362 p., 1988.

[10] Michael J. Grubb, Thierry Chapuis, Minh Ha Duong , *The economics of changing course: implications of adaptability and inertia for optimal climate policy*, Energy Policy, 23(4/5), 417-432, 1995.

[11] Minh Ha Duong, Michael J. Grubb, Jean-Charles Hourcade, *Influence of Socioeconomic Inertia and Uncertainty on Optimal CO2-emission abatement*, Nature, 390, 270-274, 20 nov 1997. En ligne à http://www.nature.com/Magazine/Archives/SuppInfo/kyoto/kyoto270.pdf, accès le 16/1/98.

[12] Royal Swedish Academy of Science, *Press Release: The Bank of Sweden Prize in Economic Sciences in Memory of Alfred Nobel 1997*. En ligne à http://www.kva.se/economy97.html, accès 16/1/98.

[13] Robert S. Pindyck, *Irreversibility, Uncertainty, and Investment*, Journal of Economic Litterature, XXIX, 1110-1148, sep 1991.

[14] Robert J. Barro et Xavier Sala-i-Martin, *Economic Growth*, chapitres 6 à 8, McGraw Hill, Boston, MA, 539 pages, 1995.

[15] Stephen H. Schneider et Lawrence H. Goulder, *Achieving Low-Cost Emissions Targets*, Nature, 389, 13-14, 4 sep 1997

[16] Costas Azariadis et Roger Guesnerie, *Prophéties Créatrices et Persistance des Théories*, Revue Economique, 5, 787-806, sep 1982.

[17] CMED, *Notre Avenir à Tous*, sous la présidence de Gro Harlem Brundtland , Éditions du Fleuve, Montréal, Québec, Canada, 432 pages, décembre 1988. Publié originellement en langue anglaise par Oxford University Press sous le titre *Our Common Future*, 1987.

[18] Eric Haites, présentation au congrès 'Modélisation et Incertitude', IEA, OCDE, Paris, 1997.

[19] Fumio Hayashi, *Tobin's marginal q and average q: a neoclassical interpretation*, Econometrica, 50(1), 213-224, janvier 1982.

[20] IPCC SAR, WG I, Table 5.1

[21] Klaus Hasselman, *Are We Seeing Global Warming ?*, Science, 276 (5314), 914 - 915, 9 May 1997.

[22] Wallace S. Broecker, *Thermohaline Circulation, the Achilles Heel of Our Climate System: Will Man-Made*

Références Bibliographiques

CO2 Upset the Current Balance, Science, 278, 1582-1589, 1997.

[23] Gérard Mégie, *Incertitude scientifique et décision politique: le cas "historique" de l'ozone stratosphérique,* mimeo, 1995.

[24] Jean-Charles Hourcade et Thierry Chapuis, *No-regret Potentials and Technical Innovation*, Energy Policy, 23(4/5), 433-445, 1995.

[25] Costas Azariadis et Roger Guesnerie, *op. cit.,* 1982.

[26] Ian G. Enting, Tom M. L. Wigley et M. Heimann, *Future Emissions and Concentrations of Carbon Dioxide: Key Ocean / Atmosphere / Land Analyses* , p. 34, CSIRO Division of Atmospheric Research Technical Paper Number 31, Australia, 1994. En ligne à www.cdiac.ornl.org, .

[27] Jean-Claude Duplessy et Pierre Morel, *Gros temps sur la planète*, p. 265, Odile Jacob, Paris, 1990.

[28] Wallace Broecker, *L'Origine des Glaciations*, Pour la Science, Hors série 'l'Atmosphère', p. 28-34, juin 1996.

[29] Tom M. L. Wigley, Richard Richels et Jae Edmonds, *Economic and Environmental Choices in the Stabilisation of Atmospheric CO_2 Concentrations*, Nature, 379, 240-243, 1996.

[30] IPCC Working Group III, *Résumé à l'intention des décideurs :aspects socio-économiques de l'Évolution du climat*, paragraphe 10, 1996.

[31] Joseph Alcamo, Eric Kreileman et Rik Leemans, *Global Models meet Global Policy*, Global Environmental Change, 255-259, 6(4), 1996.

[32] D. H. Meadows, D. L. Meadows, J. Randers et W. Behren, *The limits to Growth*, Universe Books, New York, 1972. En français : *Halte à la croissance: rapport sur les limites de la croissance*, Fayard, Paris, 1972.

[33] W. Häfele, *Energy in a Finite World*, Ballinger Publishing, Cambridge, MA, 1980.

[34] L. Hordijk, 1991

[35] William D. Nordhaus, *Managing the Global Commons, The Economics of Climate Change*, MIT Press, Cambridge, MA, 213 p, 1994.

[36] J. Rotmans, *IMAGE : an Integrated Model to Assess the Greenhouse Effect*, Kuwler, 1990.

[37] Nordhaus, *op. cit.*, 1994.

[38] Ha Duong, Grubb et Hourcade, *op. cit.,* 1997.

[39] Wigley, Richels et Edmonds, *op. cit.*, 1996.

Chapitre 2. Les conditions du problème du changement climatique

Nous voulons montrer ici comment l'irréversibilité et l'incertitude, dont nous avons introduit la problématique au chapitre précédent, sont au coeur des débats scientifiques autour du problème du changement climatique. L'organisation de ce chapitre s'inspire du Second Rapport d'Evaluation du GIEC pour les trois premières sections : nous commencerons par les conditions géophysiques du changement global, puis nous verrons les incidences de l'évolution du climat et les possibilités d'adaptation et examinerons ensuite les aspects économiques du problème. Dans la quatrième et dernière section, nous aborderons des aspects plus politiques, liés aux particularités des différentes régions du monde.

La première section qui va suivre s'intéresse à la présence d'irréversibilités et d'incertitudes dans le phénomène physique. Il s'agit là de la première difficulté du dossier 'effet de serre' du point de vue de la décision, et cela nous permet aussi de motiver l'objet de cette thèse sur des bases concrètes. Cette section étant davantage consacrée à l'exposition qu'à l'analyse, elle est construite autour d'un encart de figures regroupées en fin de section page 42.

1. Aspects géophysiques: Un système susceptible de surprendre

Toute influence de l'homme sur le climat, et en particulier sur l'effet de serre (Figure 2.1), se superpose au "bruit de fond" représenté par sa variabilité naturelle. Celle ci relève aussi bien de fluctuations internes du système climatique que de causes externes telles que la variabilité de l'activité solaire ou les éruptions volcaniques. Les études de détection et d'attribution s'efforcent d'établir une distinction entre les influences naturelles et celles qui relèvent de l'homme. La détection est l'opération consistant à démontrer qu'un changement climatique observé est hautement inhabituel au sens statistique. Cette opération ne vise pas à déterminer les motifs du changement. L'attribution est l'opération consistant à établir des relations de cause à effet et notamment à contrôler le bien-fondé de différentes hypothèses possibles.

1.1. La détection et l'attribution du changement climatique

La majorité de la communauté scientifique étudiant les sciences du climat est préoccupée depuis de nombreuses années par l'existence d'une perturbation d'origine anthropique du système climatique. Mais jusqu'à une date récente, on ne disposait pas de preuves statistiques montrant que le changement climatique observé ne peut pas être expliqué totalement par la variabilité naturelle. Pour expliquer ce qui a permis aux experts du GIEC de renverser leur conclusion réservée de 1990 sur la détection et l'attribution, commençons par examiner la cause, l'augmentation de la concentration de gaz à effet de serre, puis l'effet, le changement climatique.

⇒ *La concentration de gaz à effet de serre continue d'augmenter.*

En moins de 200 ans les concentrations des gaz à effet de serre[a] se sont élevées à des niveaux jamais atteints depuis que l'humanité existe.

[a] Le Protocole de Kyoto définit comme gaz à effet de serre le dioxyde de carbone CO_2 , le méthane CH_4 , l'oxyde nitreux N_2O, ainsi que les hydrofluorocarbones HFCs, les hydrocarbures perfluorés PFCs et l'hexafluorure de soufre SF6. Il ne recouvre pas la vapeur d'eau, l'ozone ni les substances controlées par le protocole de Montréal, notamment les CFS. Ces dernières substances jouent aussi un rôle dans l'effet de serre mais sont moins cruciales politiquement.

La Figure 2.7 montre que la concentration de CO_2 était en équilibre avant la révolution industrielle (aux environs de 280 ppmv). Or, comme le grossissement sur la partie finale de la courbe le montre, la concentration et les émissions suivent aujourd'hui une croissance exponentielle. Ces perturbations du cycle du CO_2 , illustrées Figure 2.10, proviennent des activités de l'homme. La Figure 2.11 illustre ces effets: en brûlant des combustibles fossiles et en défrichant, l'humanité augmente le niveau de dioxyde de carbone dans l'atmosphère.

D'après le GIEC, il suffirait que les émissions de CO_2 se maintiennent à leur niveau actuel pour que la concentration augmente de façon constante pendant au moins 200 ans. Or il ne fait guère de doutes que les émissions tendent plutôt à la hausse, sous l'impulsion de la croissance démographique et économique mondiale. Les modèles du cycle du carbone du GIEC indiquent que la teneur de l'atmosphère en CO_2 ne pourrait se stabiliser autour de 450 ppmv, respectivement 650 ppmv que si les émissions de CO_2 d'origine humaine revenaient au niveau de 1990 d'ici 40, respectivement 140 ans, et si elles diminuaient nettement par la suite.

Les autres gaz à effet de serre s'accumulent aussi de façon irréversible à court terme, puisque comme le CO_2 la plupart restent dans l'atmosphère plusieurs dizaines ou plusieurs centaines d'années. L'agriculture intensive, l'extraction du charbon et les fuites dans les réseaux de distribution sont les principales sources de méthane. Les oxydes d'azote et l'ozone à basse altitude sont aussi en augmentation. La stabilisation des concentrations aux niveaux actuels exigerait une réduction des émissions anthropiques de 8% pour le CH_4 et 50% pour N_2O.

⇒ *Le climat a évolué depuis le siècle dernier.*

En ce qui concerne le climat, les données laissent apparaître d'importantes variations temporelles et géographiques. Toutefois, comme on le voit sur la Figure 2.3, en moyenne globale la température de surface a augmenté de 0,3 à 0,6°C environ depuis la fin du XIXe siècle. Les années récentes ont été les plus chaudes depuis 1860 (début de la période d'instrumentation), et ce malgré l'effet de refroidissement dû à l'éruption du mont Pinatubo en 1991. Toujours en moyenne globale, le niveau de la mer s'est élevé de 10 à 25 cm au cours des 100 dernières années (Figure 2.4). Ce phénomène est imputable en grande partie à l'augmentation de température du globe. On observe aussi un recul généralisé des glaciers.

La Figure 2.8 montre que des modifications sont également observées à l'échelle régionale. Par exemple, c'est dans les régions continentales des latitudes moyennes, en hiver et au printemps, que le réchauffement climatique récemment observé a été le plus prononcé, avec un refroidissement dans certaines zones telles que l'Atlantique Nord.

⇒ *On comprend mieux le climat.*

La Figure 2.2 montre que les changements de concentration des gaz à effet de serre ont été associés à des changements climatiques spectaculaires dans le passé. Toutefois, observer une corrélation ne permet pas de déduire la causalité. Voyons pourquoi aujourd'hui, la majorité des scientifiques pensent que le réchauffement observé ne peut plus être expliqué par la variabilité naturelle[1].

Plusieurs types d'observations suggèrent une influence humaine discernable sur le climat global. Les indices vont des changements de la température moyenne en surface de l'air aux changements dans les variations géographiques, saisonnières et verticales de la température atmosphérique. Sur le plan théorique, les seules variations des paramètres astronomiques ne suffisent pas à expliquer totalement les glaciations : il y a des indices forts qui montrent que les gaz à effet de serre ont joué un rôle significatif dans le réchauffement qui a suivi le dernier âge glaciaire, il y a 20 000 ans. Enfin, sur le plan empirique, le réchauffement mesuré est en accord avec les résultats des modèles climatiques qui tiennent compte des émissions passées.

La détection et l'attribution du changement climatique constitue résultat le plus spectaculaire obtenu par la science du climat entre 1990 et 1995. Pour Hasselmann[2], deux facteurs expliquent ce progrès outre les avancées des méthodes et des moyens de modélisation évoqués au chapitre précédent :

- La qualité du signal s'est améliorée. Comme nous l'avons vu, les émissions ont continué à augmenter. De plus, les analyses se sont concentrées sur les données récentes, les tendances sur les 30 dernières années ayant un meilleur rapport signal-bruit que les séries sur 100 ans utilisées précédemment.
- Les modèles récents prennent en compte l'effet refroidissant direct et indirect des aérosols troposphériques[a]. Cet effet, illustré Figure 2.9, peut être localement plus important que le réchauffement global. Il peut donc expliquer, par exemple, l'existence de zones de refroidissement qui étaient visibles Figure 2.8. Notons toutefois que contrairement aux gaz à effet de serre, les aérosols d'origine humaine ont une durée de vie très courte dans l'atmosphère. C'est pourquoi le forçage radiatif qui leur est imputable suit rapidement l'augmentation ou la diminution des émissions. Leur effet risque donc de disparaître avec la diminution des pluies acides et des brûlis.

Des indicateurs de nature statistique qui s'appuient sur la distribution spatiale et temporelle des changements, comme ceux représentés Figure 2.5 et Figure 2.6, permettent de séparer le signal (représenté par le changement climatique) du bruit de fond (la variabilité naturelle du climat). La majorité de ces indicateurs sont positifs, ce qui a permis à la seconde évaluation du GIEC de conclure dans son rapport de synthèse :

Un faisceau d'éléments suggère qu'il y a une influence perceptible de l'homme sur le climat global.

On peut donc dire que l'augmentation de la concentration de gaz à effet de serre depuis l'époque préindustrielle (1750 environ) a conduit à un forçage radiatif[b] supplémentaire tendant à réchauffer la surface du globe et à produire d'autres changements climatiques.

1.2. De grandes incertitudes subsistent.

L'augmentation de la concentration des gaz à effet de serre va affecter le climat, mais on ne sait pas encore bien précisément comment. Les différentes composantes du climat terrestre interagissent d'une façon complexe, causant des variations naturelles dont beaucoup sont encore mal comprises aujourd'hui. A cause de l'augmentation rapide sans précédent des concentrations de gaz à effet de serre, nous entrons à long terme dans un régime climatique nouveau, inexploré jusqu'ici. Mais nous allons voir que même si nous comprenions d'une façon nettement meilleure le système climatique actuel, le futur pourrait nous réserver des surprises.

⇒ *Un changement déjà rapide*

Lorsque la dernière glaciation a pris fin, la concentration de gaz carbonique est passée de 180 à 300 parties par million en l'espace d'une centaine d'années. La paléoclimatologie donne aussi des exemples de bouleversement importants de la circulation océanique en moins d'un siècle[3]. Ces exemples sont confirmés par les simulations numériques et par la théorie.

Aujourd'hui, on ne mesure pas encore les conséquences du fait que la vitesse de variation de la température actuelle, de l'ordre de 0.5°C par siècle est sans commune mesure avec la vitesse moyenne de réchauffement à la fin de la dernière ère glaciaire, 1°C par millénaire. Lovelock[4] compare l'augmentation du forçage radiatif à l'effet d'une balle: un événement très bref mais très rapide peut avoir des conséquences très importantes. Jusqu'à présent toutefois, les modèles climatiques ont exploré les conséquences d'une concentration élevée mais stable de gaz à effet de serre davantage que les chemins de transition.

---

[a] Particules microscopiques en suspension dans l'air provenant de l'utilisation des combustibles fossiles, de la biomasse, et d'autres sources. Voir cependant Cane et alii (Science 275, 957-961).

[b] Le forçage radiatif est l'unité simple exprimant la perturbation du bilan énergétique du système sol-atmosphère, exprimée en Wm^{-2} . Cette unité permet de mesurer l'ampleur d'un mécanisme susceptible de conduire à un changement climatique. Au prix de l'utilisation de modèles plus ou moins sophistiqués, elle permet de comparer sur une même échelle l'effet de gaz différents.

L'échelle de temps pour l'évolution de la société humaine se situe entre plusieurs années et plusieurs décennies[5]. L'unité convenable pour étudier le climat est plus difficile à définir, tant les échelles de temps sont étendues de plusieurs décennies à plusieurs millénaires. Il apparaît toutefois que le temps d'évolution de la société humaine et celui du climat pourraient être comparables, à l'échelle de la décennie. Pour la suite de cette thèse, il importe de noter ce point : l'évolution du climat peut ne pas être lente devant l'évolution de la société.

⇒ *Un changement important à long terme*

Si les scientifiques se préoccupent aujourd'hui davantage du risque lié à la vitesse du changement climatique, le risque lié à la magnitude du changement reste très significatif à long terme, comme le rappelle Cline[6]. Dans le scénario de référence IS92a, la concentration de CO_2 atmosphérique atteint un niveau de 650 ppmv avant la fin du XXIe siècle. Si elle se stabilisait instantanément à ce niveau, l'augmentation de température à l'équilibre pourrait être comprise entre +2.5°C et +7°C. Ce réchauffement est comparable à celui, de l'ordre de 5 à 7°C, qui s'est produit entre le dernier âge glaciaire et l'époque actuelle.

Si l'on suppose que l'on ne fait rien pour réduire les émissions, les modèles numériques indiquent[7] que la température moyenne de surface de la terre augmentera de 1 à 3 degrés C au cours des 100 prochaines années. Cette augmentation est plus importante et probablement plus rapide que tout ce qui s'est passé au cours des derniers 9000 ans. Même si des incertitudes subsistent et justifient une intensification de la recherche, les conditions générales du problème du changement climatique sont suffisamment claires pour motiver les négociateurs de la Convention Climat. A long terme, il est nécessaire de réduire les émissions de gaz à effet de serre bien en dessous du niveau actuel, afin d'éviter de subir des conséquences graves.

⇒ *Risque de surprises*

Les systèmes non linéaires connaîssent des catastrophes[a] , et le système climatique l'est. Ces changements brutaux sont d'autant plus vraisemblable que le système est soumis à des perturbations importantes et rapides, et nous venons de montrer qu'ils l'étaient aussi. Donnons trois exemples :

- Nous ne saurions mieux exposer que Jean-Claude Duplessy[8], la question de la stabilité de la circulation thermohaline dans l'Atlantique Nord et du climat Européen :

  > *« Grâce au Gulf Stream, l'Europe occidentale connaît des températures extrêmement douces par rapport aux régions situées aux mêmes latitudes. Ce courant pompe de la chaleur dans l'hémisphère Sud et la restitue dans l'hémisphère Nord, comme un énorme tapis roulant avec une partie en surface, et autre, invisible, en profondeur. C'est dans la partie Nord de l'Atlantique que les eaux refroidies plongent pour continuer leur circuit. Lorsqu'elles ne plongent plus, et il pourrait suffire pour cela d'un apport très important d'eau douce en surface, le Gulf Stream se ralentit ou s'arrête. Un tel phénomène s'est produit il y a 12 600 ans, au sortir de la glaciation du Dryas récent, avec la débâcle des glaces arctiques. L'hémisphère Nord a connu un retour de l'ère glaciaire qui a duré mille ans et dont il est sorti , aussi vite qu'il y était rentré, en moins de 70 ans. Tout cela aurait pu se reproduire plus récemment : entre 1965 et 1980, on trouvait une énorme lentille d'eau peu salée entre le Groenland et la Norvège. Pour le futur, des simulations numériques confirment la possibilité d'un affaiblissement de la circulation océanique, temporaire ou définitif selon les hypothèses concernant les émissions de gaz à effet de serre. »*

- La plus importante source connue de variabilité interannuelle du climat est le phénomène El Niño - Oscillation Australe (ENSO). Il s'agit d'un affaiblissement des alizés accompagné d'un reflux vers l'est des eaux superficielles chaudes du bassin pacifique. Ce mouvement modifie les transferts d'énergie de l'océan vers l'atmosphère et perturbe complètement la circulation atmosphérique : sécheresse à l'est du Pacifique et pluie à l'Ouest, mais aussi sécheresse en Afrique et sur la côte Atlantique de d'Amérique du Sud[9]. Le changement de son comportement vers 1976/77, marqué par

[a] Au sens mathématique du terme, c'est à dire une évolution discontinue à partir d'un processus continu.

une persistance sans précédent connu entre 1990 et 1995 et une intensité record en 1997, pose aux experts du changement climatique une question qui reste à traiter dans les rapports du GIEC.

- La dislocation de la calotte glaciaire Ouest-Antarctique provoquerait une montée rapide du niveau des mers. Le problème est que ces glaces reposent sur un socle rocheux à une altitude inférieure au niveau de la mer. L'équilibre est donc instable puisque la densité de l'eau est supérieure à celle de la glace. La question est d'autant plus sérieuse que la dynamique d'écoulement de la glace a pu connaitre récement des variations rapides mal expliquées[10].

Ces trois exemples sont souvent cités car la recherche actuelle s'en préoccupe beaucoup, non sans un certain succès : le dernier événement El Niño a été prédit[11] et il semblerait possible de prévoir la variabilité climatique multidécennale de l'Atlantique Nord[12][13].

Toutefois, l'énumération ci dessus n'est pas limitative, il ne s'agit que d'exemples illustratifs. Certes, la connaissance scientifique du système climatique progresse à un rythme soutenu, mais la complexité du Monde demeure. La débâcle en 1997 du "glacier de feu" Vatnajökull, conséquente à l'éruption du volcan Grimsvötn en Islande, rappelle l'existence d'événements naturels extrêmes imprévisibles.

1.3. Conclusion : le problème est réel et sérieux

Toute controverse n'est cependant pas complètement éteinte. Certains auteurs comme Pat Michaels[14] ou Richard S. Lindzen[15] soulignent le manque de capacité prédictive des modèles actuels. En effet, certains paramètres comme la magnitude de l'effet indirect des aérosols, les rétroactions possibles provenant de la vapeur d'eau ou des écosystèmes terrestres sont encore mal connus. Certains porte parole de groupes de pression industriels contre la limitation des émissions, comme Gail McDonald[16] , en tirent la conclusion qu'il est urgent d'attendre.

Les modèles climatiques qui indiquent que l'un des principaux effets des émissions de gaz à effet de serre sera le réchauffement global sont loin d'être parfaits certes. Mais la plupart des scientifiques croient qu'ils donnent les meilleures estimations du changement climatique dont on puisse disposer, et ces modèles sont validés par des explications qualitatives simples établies depuis plus d'un siècle[17][18].

Cependant, si les modèles actuels sont faux, ils peuvent l'être dans les deux sens. Les scénarios d'émission et les résultats des modèles peuvent sur-estimer le risque, mais ils peuvent tout autant le sous-estimer. Les sondages d'experts de Morgan et Keith[19] et Nordhaus[20] montrent que, bien que les opinions divergent, les scientifiques attribuent une probabilité de l'ordre de 10% aux deux hypothèses extrêmes pour la sensibilité climatique (négligeable, moins de 1°C, ou très importante, plus de 5°C). En conséquence, il peut sembler que l'incertitude fournit plutôt une raison supplémentaire d'agir.

Au total, bien que de nombreuses incertitudes subsistent, on peut conclure que le risque du changement climatique est réel et sérieux. Ce risque s'augmente d'une incertitude concernant les surprises possibles. Il est d'autant plus préoccupant que l'accumulation des gaz à effet de serre est irréversible, la plupart restant présent dans l'atmosphère de plusieurs dizaines à plusieurs centaines d'années.

Les auteurs cités plus haut comparent la fiabilité des sciences du climat avec la fiabilité de la physique en général, ce qui les conduit à rejeter le message d'alerte. Toutefois, l'enjeu n'est pas une expérience de mécanique des fluides, mais la question d'une action internationale contre le changement climatique. A ce titre, les sciences du climat doivent se comparer aux autres sources d'information qui éclairent l'action publique comme l'économie, l'histoire ou les sciences politiques. Le rapport entre ce que nous ignorons du système économique et la politique économique est bien commensurable avec le rapport entre ce que nous ignorons du système climatique et la politique climatique.

Les incertitudes ne doivent donc pas être exagérées, ce qui ne sert d'ailleurs plus à rien. En effet, la signature de la Convention Climat prouve que, sur la base du principe de précaution[a], les conclusions précédentes suffisent à motiver une action publique.

---

[a] L'ignorance ne doit pas servir de prétexte à l'inaction.

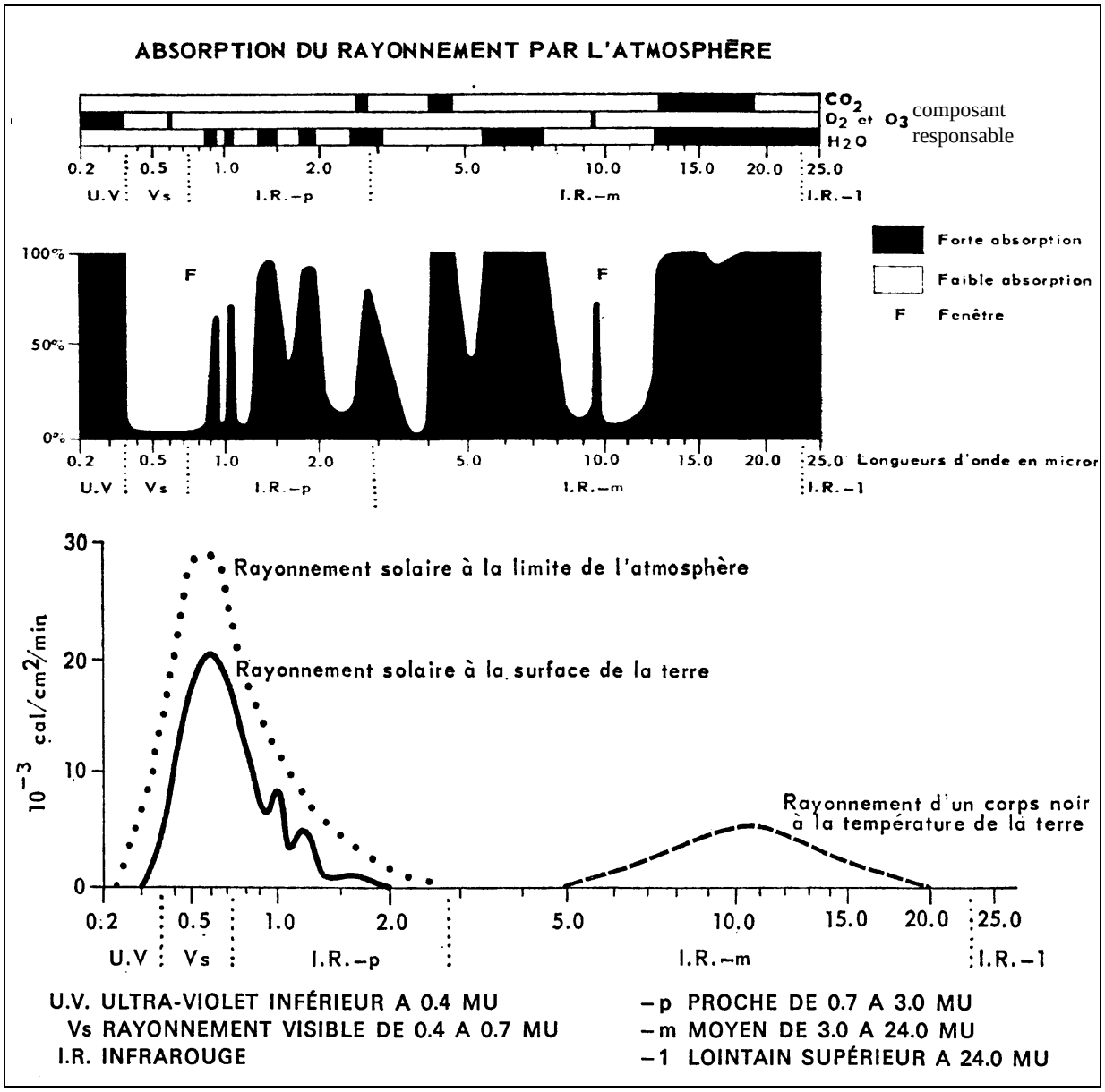


Figure 2.1 : Spectres de rayonnement et absorption atmosphérique.

Ces figures expliquent le mécanisme physique de l'effet de serre. En haut: Spectre absorption de trois importants gaz à effet de serre. Au milieu: spectre d'absorption de l'atmosphère. En bas: Spectre du rayonnement solaire à la limite de l'atmosphère, à la surface de la terre, et rayonnement d'un corps noir à la température de la terre, l'axe vertical représente le flux d'énergie rayonnante par minute par centimètre carré. Les axes horizontaux sont les mêmes, ils représentent des longueurs d'onde graduées en microns (10^{-6} m), selon une échelle logarithmique. Source: Hufty André, 1976, Introduction à la climatologie. Presses Universitaires de France, Collection Magellan, Paris

En bas, les deux courbes de gauche sont relatives à l'énergie solaire reçue. Le rayonnement est moins intense à la surface du sol qu'en haute altitude : l'atmosphère n'est pas parfaitement transparente, une certaine partie de l'énergie du rayonnement incident est absorbée. La courbe de droite représente le rayonnement d'un corps noir à la température de la terre, c'est à dire à peu près le rayonnement que la surface de la terre émet vers le ciel. On voit clairement que le rayonnement solaire et le rayonnement de la surface de la terre sont de nature différente : l'essentiel de l'énergie reçue se trouve dans le visible et dans l'infrarouge proche, autour de 0,7µ. alors que l'essentiel de l'énergie émise se trouve dans l'infrarouge moyen, autour de 10µ. . L'atmosphère est plutôt transparente au rayonnement reçu, et plutôt opaque au rayonnement réémis: c'est l'effet de serre.

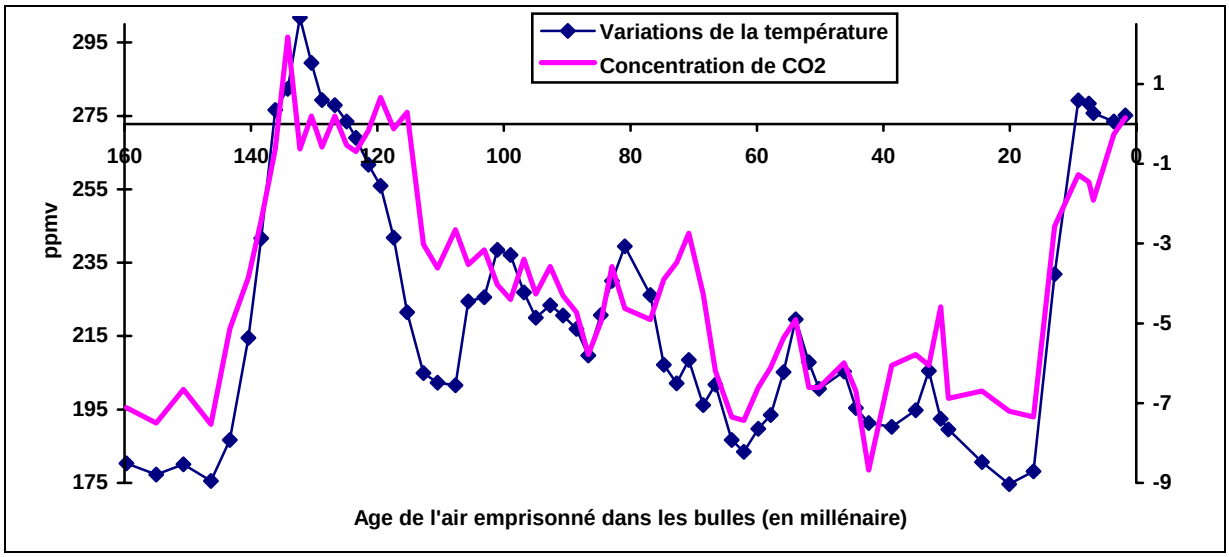


Figure 2.2 : Concentration de CO_2 et température : - 160 000 à nos jours.

La température concerne l'air à Vostock Station. En moyenne globale, lors du dernier âge glaciaire il y a 20 millénaires, la terre était 5 à 7 degrés plus froide qu'aujourd'hui et l'océan 2 à 3° plus froid. Le réchauffement s'est produit à la vitesse de 1° par millénaire, en moyenne (Schneider, 1997, Duplessy, 1997). Source : Vostock Station, Atmospheric concentration of CO_2 from ice cores, Trend 1993 p.592., d'après Chapuis 1996

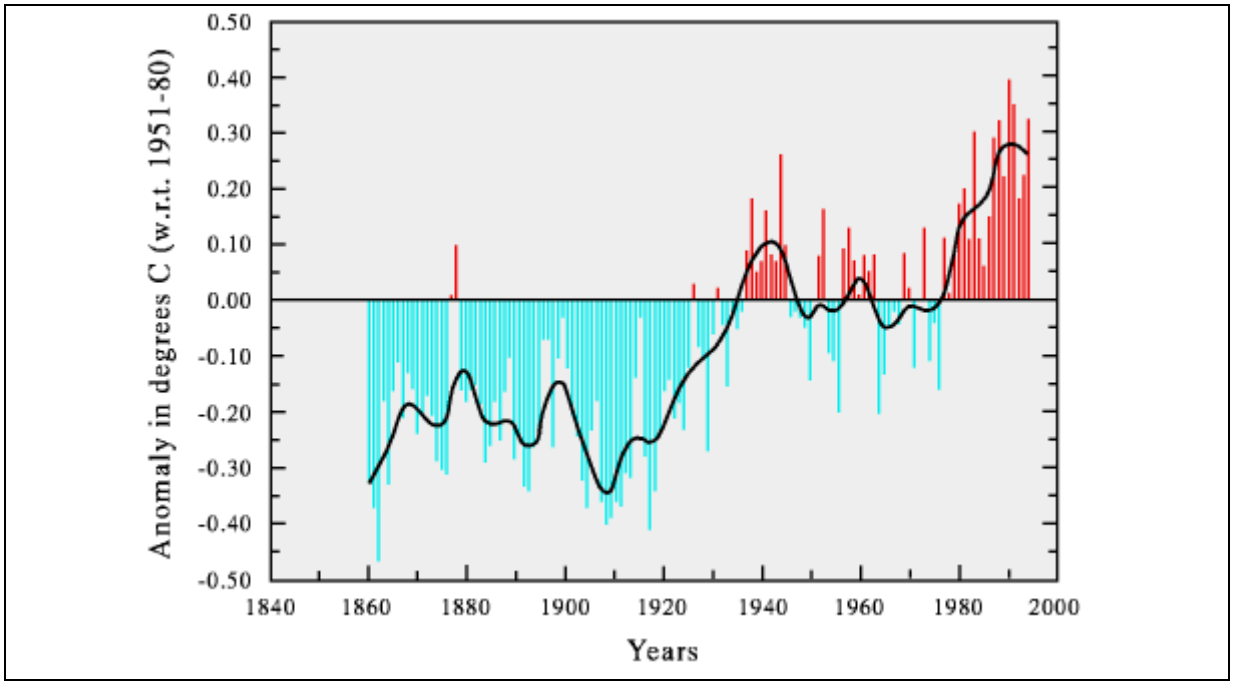


Figure 2.3 : Evolution globale de la température.

Valeur annuelle de la température combinée de la surface maritime et terrestre depuis 1860, déviation en °C par rapport à la moyenne 1951-80. La courbe lissée est obtenue en filtrant sur 21 ans. Source : David Parker, Hadley Centre (1995), in IPCC (1996)

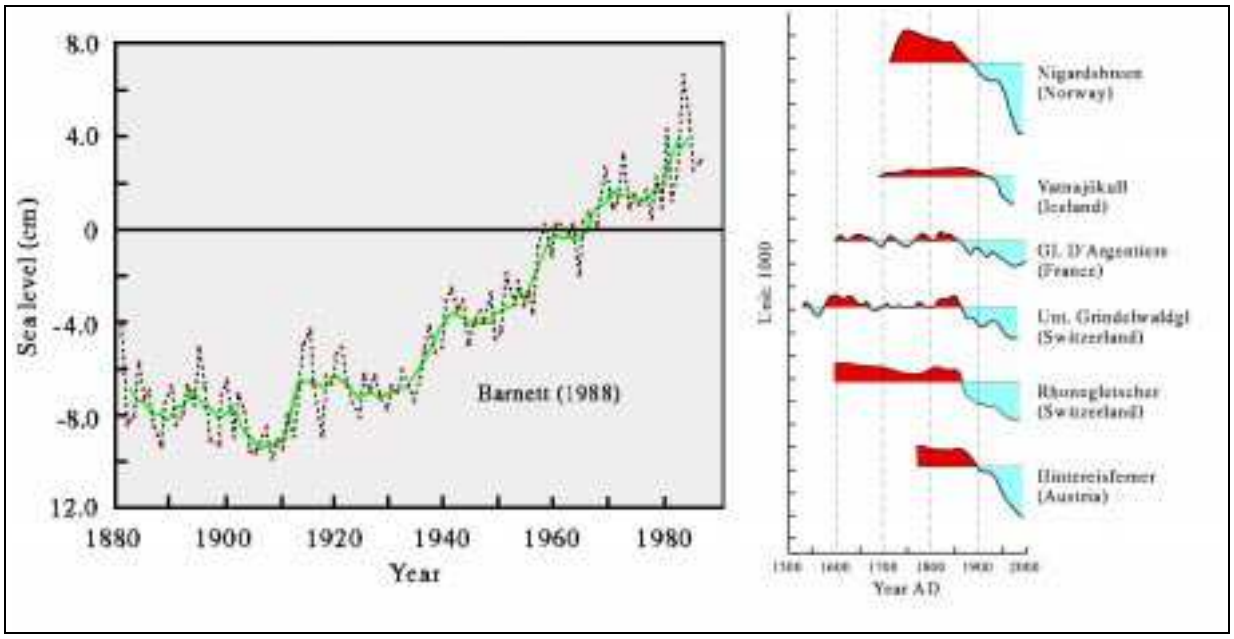


Figure 2.4 : Evolution du niveau de la mer généralisé sur tout le globe.

Moyennes annuelle et glissante sur 5 ans, période de base 1951-70; et évolution de certains glaciers. Source : IPCC (1990, 1995): Niveau de la mer d'après Tim Barnett, 1988; Glaciers d'après Bjornsson (1979), Ostrem et al. (1977), Kasser (1967, 1973), Kasser & Haeberli (1979), Muller (1977), Vivian (1975), Haeberli (1985)

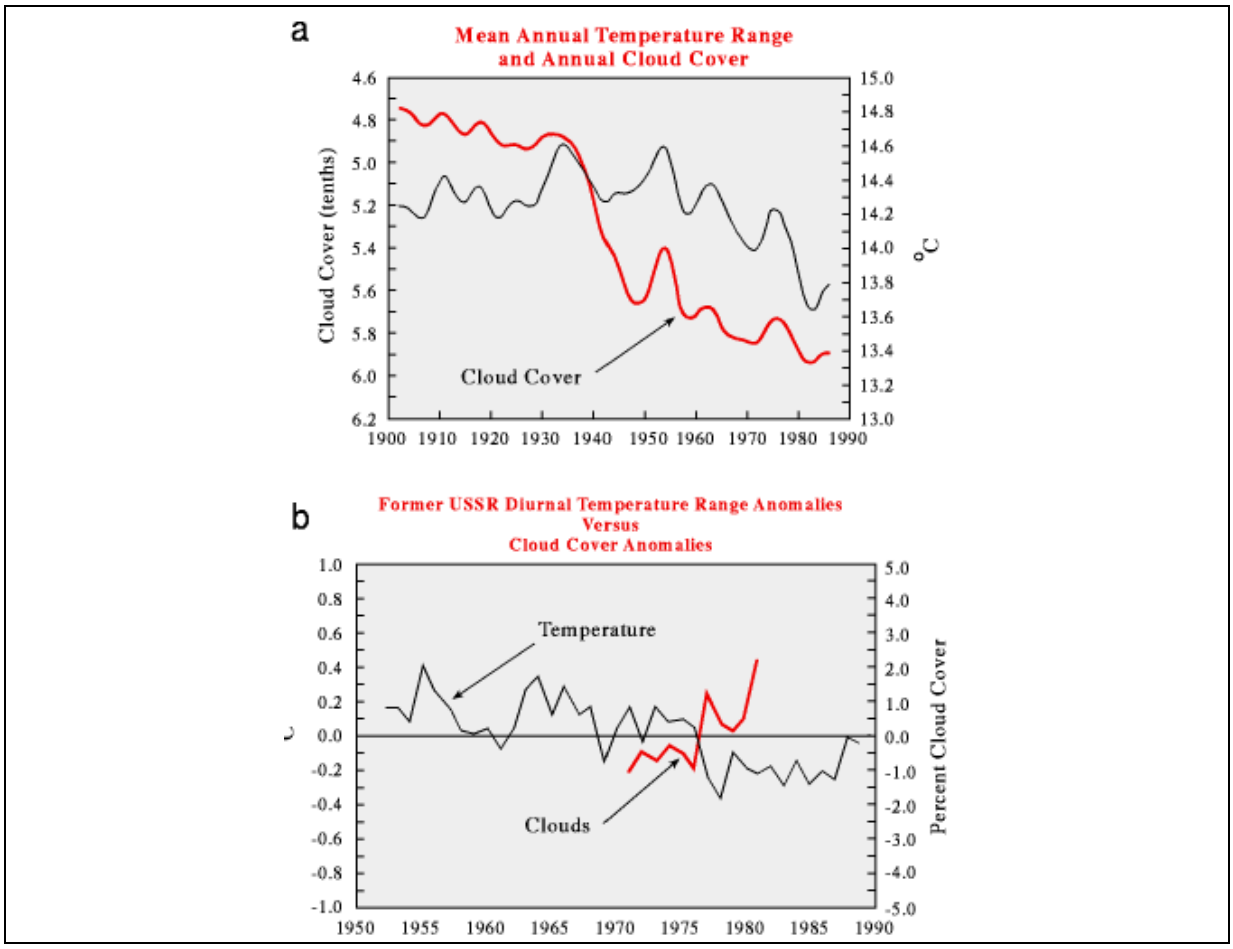


Figure 2.5 : Couverture nuageuse et amplitude thermique.

Variations de la couverture nuageuse et de l'amplitude diurne de température - moyenne géographique sur les USA pour 1900-1990, et l'ex-URSS pour 1950-1990. Les données U.S. sont lissées avec un filtre binomial à 11 points. Les données ex-URSS sont données en déviation. Source : Tom Karl et al. (1995) in IPCC (1996)

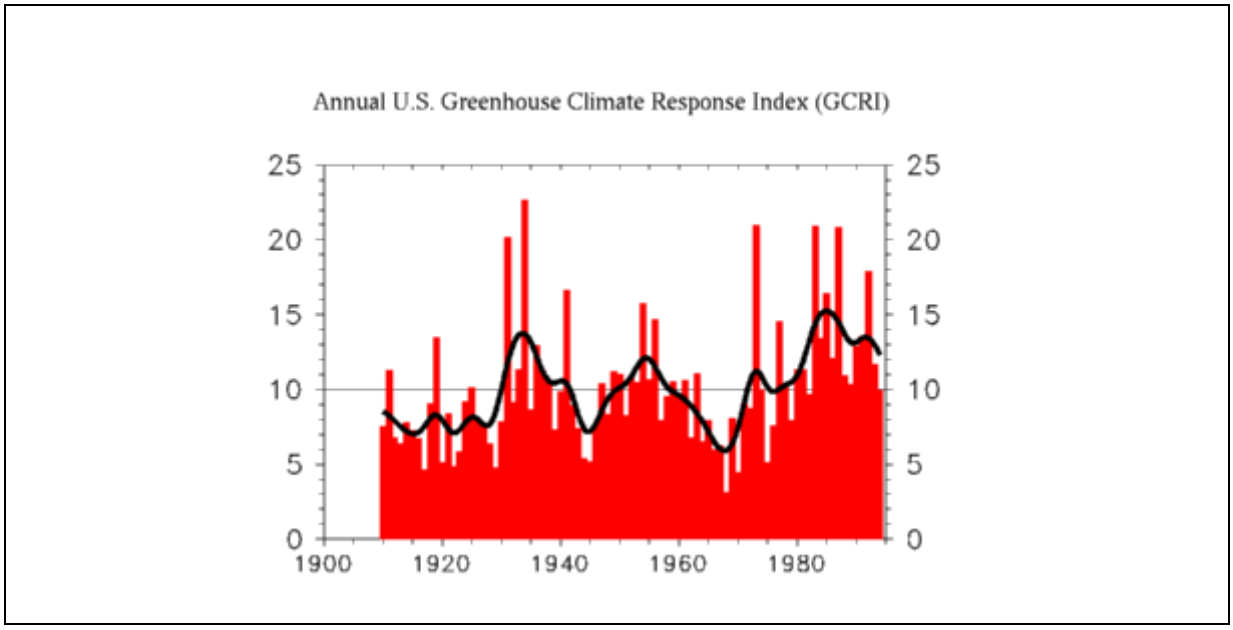


Figure 2.6 : Index américain « climat - effet de serre »

L'index américain "climat - effet de serre". Pourcentage de la superficie des Etats-Unis qui subissent un changement climatique (c'est à dire des conditions observées cohérentes avec les projections des modèles d'un renforcement de l'effet de serre). Le hasard seul produirait une valeur de 10 pour-cent (barre horizontale). Source : Tom Karl et al. (1996) in IPCC (1996)

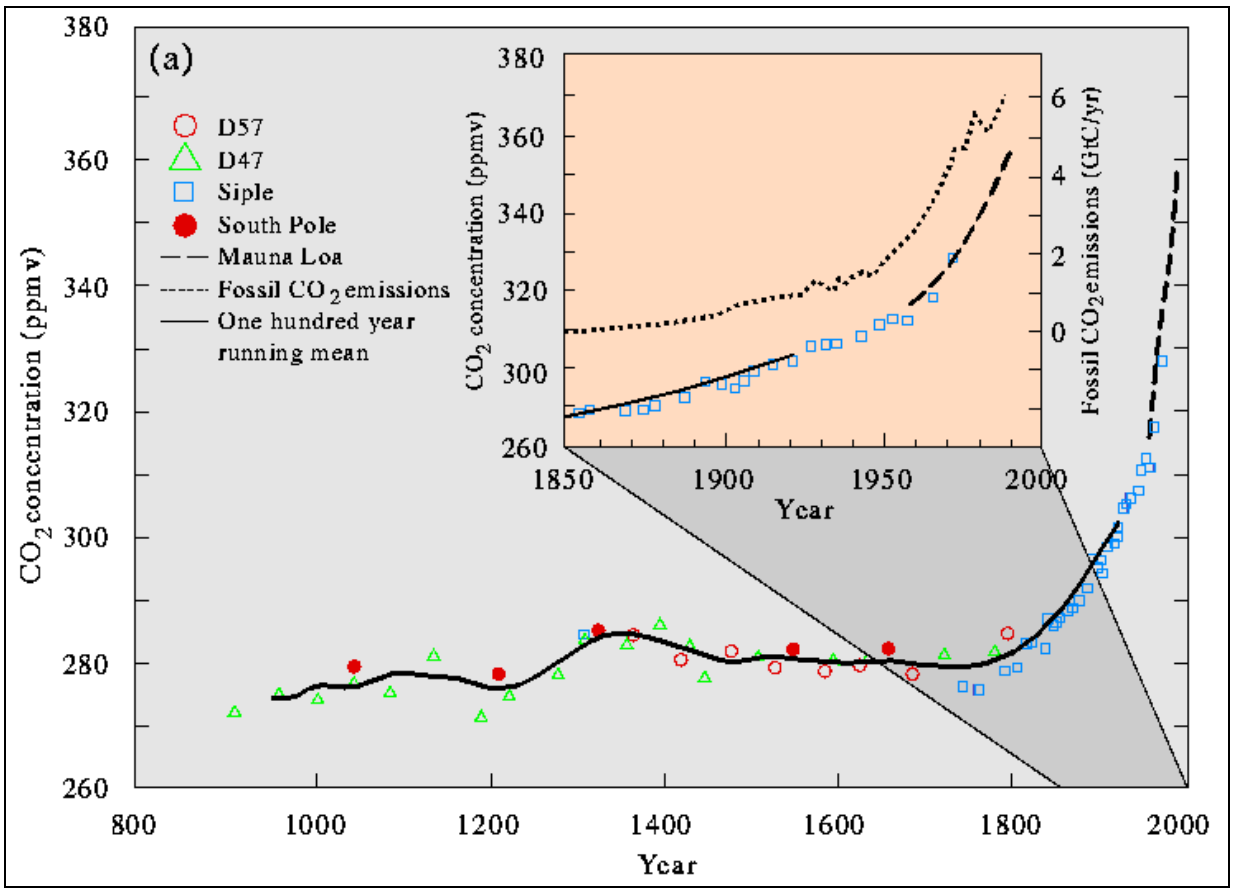


Figure 2.7 : Concentration de CO_2 sur le dernier millénaire.

Concentration mesurée d'après des carottes glaciaires (D47, D57, Siple, and South Pole stations), et depuis 1958 concentration mesurée directement à Mauna Loa, Hawaii. La concentration estimée à partir de mesures faites dans des carottes glaciaires se base sur l'analyse des bulles d'air piégées dans la glace, la datation se faisant en fonction de la profondeur sous la surface de la glace. La concentration de CO_2 est relativement ho-

mogène dans l'atmosphère, le brassage complet par les vents étant effectué en moins d'un an, contrairement à ce qui se passe pour les aérosols. Source IPCC (1990, 1995).

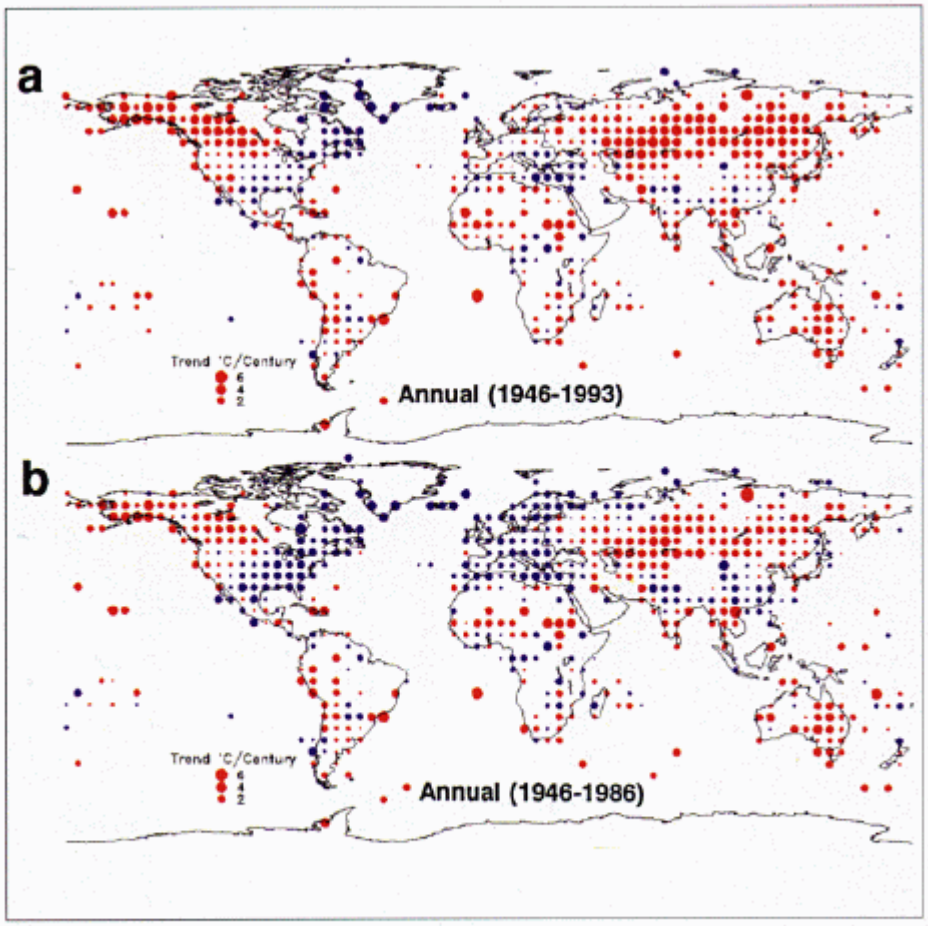


Plate 19.1 Linear temperature trends represented by the circle within each 5° × 5° land-based grid cell: (a) annual 1946–1993, (b) annual 1946–1986. Red circles represent positive trends; blue circles negative trends; and size of dot represents magnitude of trend.

Figure 2.8 : Evolution locale de la température.

Coefficients de variation de la température changement climatique:locale, représentés par un disque tous les 5 degrés de latitude et de longitude (terres émergées seulement). La teinte grise correspond à un réchauffement, le noir à un refroidissement. La taille du disque est proportionnelle à la magnitude de la tendance. Source : Tom Karl et al. (1995) in IPCC (1996).

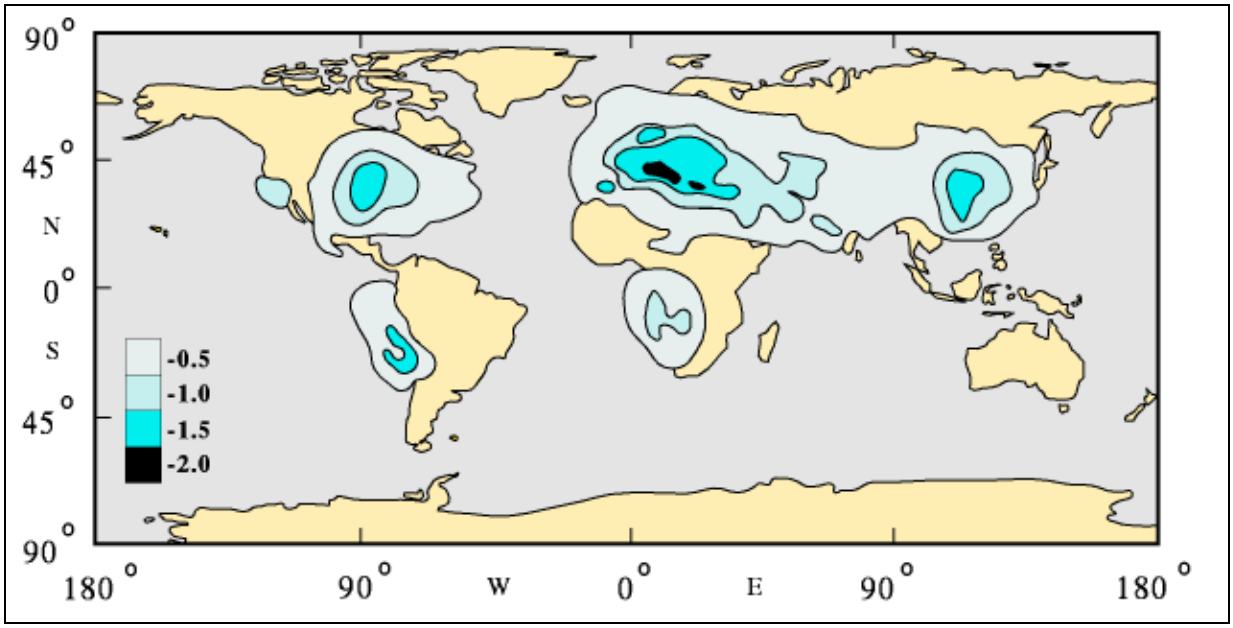


Figure 2.9 : Refroidissement dû aux aérosols.

Distribution géographique modélisée du forçage radiatif annuel moyen direct (Wm^{-2}) dû aux aérosols anthropiques dans l'atmosphère. Le forçage radiatif direct imputable aux gaz à effet de serre est à peu près de 2.5 Wm^{-2} . Par comparaison, le rayonnement solaire global moyenné sur le globe (une "constante solaire"), est à peu près de 340 Wm^{-2} au dessus de l'atmosphère. Le rayonnement direct normal intercepté au sommet de l'atmosphère par le disque terrestre est d'environ 1370 Wm^{-2} (une autre "constante solaire") Source : IPCC (1990, 1995)

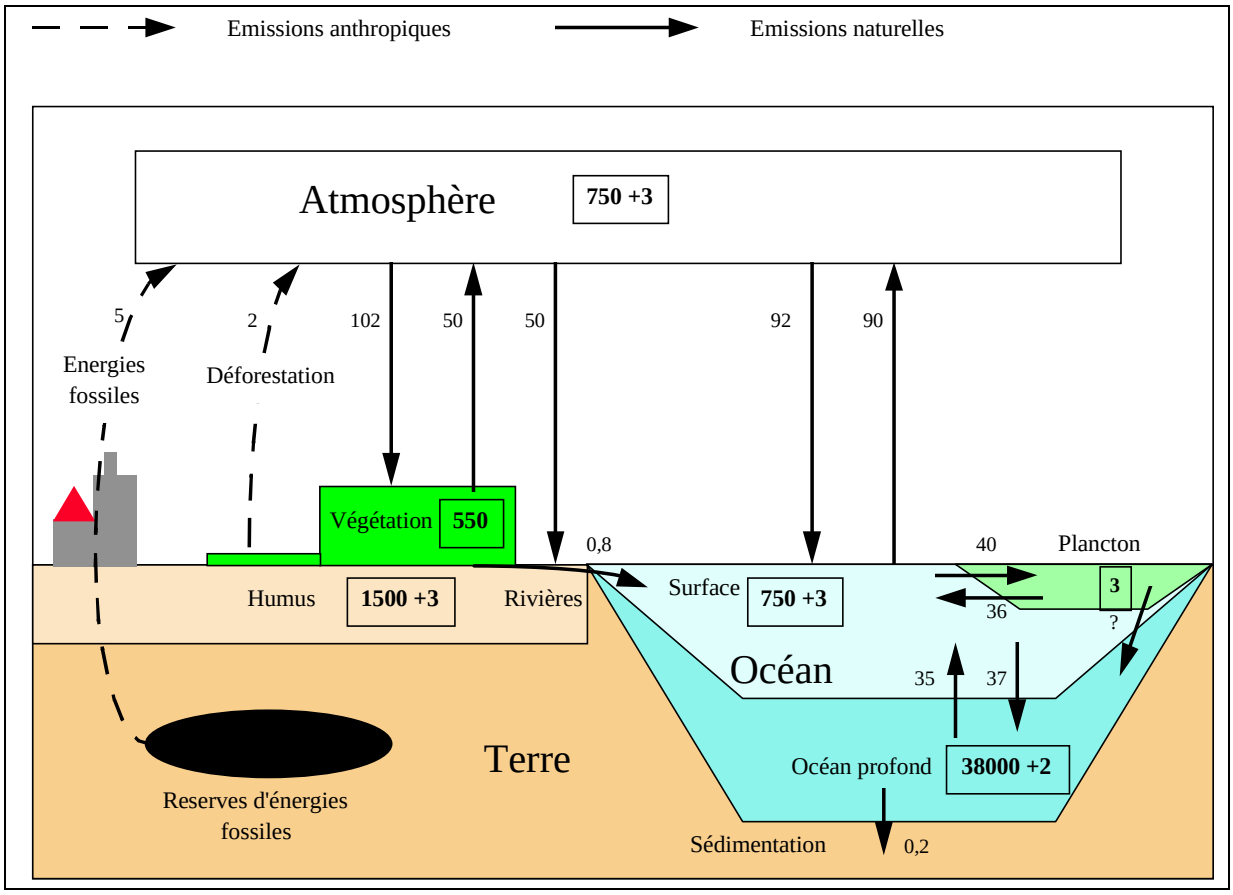


Figure 2.10 : Schéma du cycle du carbone

Flux et réservoirs globaux de carbone. L'unité est la Gigatonne de carbone GtC, qui correspond à 3.67 10^{12} kg de CO_2 (Le 3.67 est obtenu comme (12 + 2×16)/12). Depuis plusieurs décennies maintenant, l'homme perturbe le cycle en utilisant des énergies fossiles (5 GtC environ en 1990) ou en supprimant une partie du couvert végétal (2 GtC environ en 1990). Ces émissions ne sont que partiellement compensées par l'augmentation des puits naturels dans la végétation et l'océan. Sources : IPCC, 1992, d'après Chapuis 1996, et IPCC, WGI.

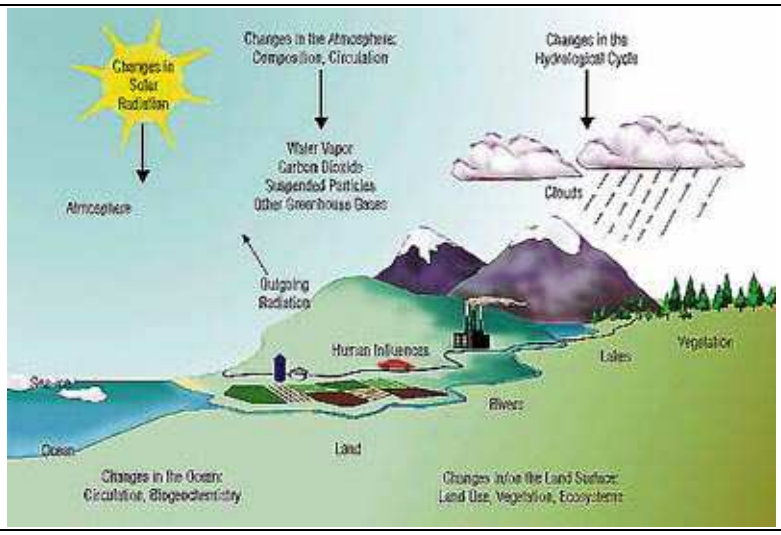


Figure 2.11 : Schéma des perturbations d'origine humaine

Source: IPCC, WGI. Les émissions passées nous engagent déjà à davantage de changement climatique dans le futur. Le climat ne répond pas instantanément aux émissions, et la plupart des gaz à effet de serre restent dans l'atmosphère plusieurs décennies après avoir été libérés, en continuant d'agir sur le climat.

2. Incidences de l'évolution du climat et mesures d'adaptation

Le paragraphe précédent a décrit l'existence d'une perturbation anthropique du système climatique. Mais l'augmentation de la température et de la hausse du niveau des mers ne sont que des causes premières des incidences de l'évolution du climat sur les sociétés. En ce qui concerne les effets finaux, les conséquences néfastes éventuelles sur le bien-être des individus, nous allons voir maintenant qu'il subsiste une controverse réelle.

Avant de commenter celle ci, nous allons d'abord examiner premièrement la sensibilité[a] des systèmes naturels et sociaux, puis deuxièmement les possibilités d'adaptation[b] et d'atténuation[c] (en anglais « mitigation ») du changement climatique.

2.1. Des effets potentiellement importants mais difficiles à cerner.

Les incidences possibles de l'évolution du climat sur les écosystèmes sont nombreuses. Ceux ci conservent encore la quasi totalité du patrimoine génétique. Ils sont aussi à l'origine d'un grand nombre de biens et services offerts à la société, comme 1) la production de la nourriture, des fibres, des médicaments et de l'énergie; 2) la transformation et le stockage du carbone et d'autres éléments nutritifs; 3) l'assimilation des déchets, l'épuration des eaux, la régularisation du ruissellement et la lutte contre les inondations, la dégradation des sols et des plages; 4) des possibilités récréatives et touristiques.

La composition et la répartition géographique de nombreux écosystèmes vont se modifier, et il faudra sans doute plusieurs centaines d'années après la stabilisation du climat pour que certains écosystèmes parviennent à un nouvel équilibre. Par exemple, on s'attend à ce que le climat évolue à une allure rapide par rapport au rythme de croissance, de reproduction et de régénération des essences forestières, et à ce qu'une proportion importante des zones actuellement boisées subisse une vaste mutation des grands types de végétation.

Les petites îles et les deltas sont particulièrement exposées aux inondations dues à des tempêtes, et le nombre de personnes menacées pourrait s'accroître plus vite. Cela pourrait obliger des populations entières à des migrations internes ou internationales.

Concernant l'agriculture, les prévisions à l'échelle globale ne sont pas pessimistes. Ces prévisions sont toutefois difficiles car, en plus de la température et du cycle hydrologique, il faut tenir compte de nombreux facteurs comme l'effet fertilisant du CO_2 , les parasites, la variabilité climatique et les modes de production. Cependant, des conséquences sensibles pourraient se produire à l'échelle locale et régionale.

Selon les résultats scientifiques actuels, l'évolution du climat va conduire à une intensification du cycle hydrologique global. Cela peut avoir des conséquences importantes sur les ressources régionales en eau, mais ces effets sont actuellement mal connus. Toutefois, ces effets additionnels se superposeront aux sérieux problèmes qui se posent d'ores et déjà dans de nombreuses régions.

Sur la santé, la diminution de la mortalité due au froid s'opposera aux conséquences de l'augmentation de l'intensité et de la durée des vagues de chaleur. Mais les conséquences indirectes devraient être prédominantes, il s'agit du risque de recrudescence des maladies infectieuses à transmission par vecteur, comme par exemple le paludisme, la fièvre dengue, la fièvre jaune et certaines encéphalites

---

[a] Selon la définition du GIEC, il s'agit la capacité d'un système à réagir à une transformation des conditions climatiques. Il s'agit par exemple du degré de modification de la composition, de la structure et du fonctionnement d'un écosystème, et notamment de sa productivité primaire, par rapport à une variation de température ou de précipitation donnée.

[b] La capacité d'un système à ajuster ses mécanismes, ses processus et sa structure à des changements climatiques hypothétiques ou réels. L'adaptation peut être spontanée ou planifiée; elle peut se produire en réponse à ou en prévision d'une évolution des conditions.

[c] Mesures de réduction des émissions et d'accroissement des puits de gaz à effet de serre

De façon générale, les progrès techniques ont élargi les possibilités d'adaptation des systèmes gérés par l'homme. En ce qui concerne les ressources en eau douce, les mesures d'adaptation envisageables comprennent une gestion plus efficace des ressources et de l'infrastructure actuelles, des dispositions institutionnelles visant à limiter la demande future et à promouvoir la conservation de ces ressources, l'amélioration des mécanismes de prévision et de suivi des inondations et des sécheresses, la remise en état des bassins versants, surtout dans les régions tropicales, et la construction de nouvelles retenues. En matière d'agriculture, ces mesures d'adaptation consistant, par exemple, à modifier les cultures ou les variétés culturales, à améliorer les techniques de gestion des eaux et d'irrigation et à modifier le calendrier des plantations et les techniques agricoles, joueront un rôle important pour limiter les effets négatifs de l'évolution du climat et pour bénéficier de ses effets positifs. Une gestion efficace des zones côtières et une réglementation de l'aménagement du territoire pourraient contribuer à éloigner les populations des secteurs vulnérables tels que zones d'inondation, collines escarpées ou zones côtières de basse altitude. Les mesures d'adaptation permettant de réduire les incidences de l'évolution du climat sur la santé sont les dispositifs de protection (logement, climatisation, épuration des eaux et vaccinations), la préparation à des catastrophes et les soins de santé appropriés.

Cependant, l'accès de nombreuses régions du monde à ces techniques et aux informations appropriées est actuellement limité. Pour certains Etats insulaires, le prix de la protection est pratiquement prohibitif, en raison essentiellement de la faiblesse des capitaux susceptibles d'être investis. L'efficacité et l'utilisation à bon compte des stratégies d'adaptation va dépendre de la disponibilité de ressources financières, des transferts de technologies et des pratiques culturelles, pédagogiques, administratives, institutionnelles, juridiques et réglementaires sur le plan national et international. La prise en compte des problèmes posés par l'évolution du climat dans les décisions concernant l'utilisation des ressources et le développement et dans les plans ordinaires d'investissements d'infrastructure va faciliter l'adaptation à cette évolution.

Encadré 2.1 : Techniques et mesures d'adaptation (GIEC Groupe II)

d'origine virale. En effet, l'aire de répartition et la durée de reproduction des vecteurs pourraient s'accroître. Mais là encore, il est difficile de quantifier les incidences en raison de nombreux facteurs concomitants et interdépendants comme l'état nutritionnel, la densité et l'accessibilité des services de soins par exemple.

Il ressort de cette section qu'il reste difficile de quantifier les effets du changement climatique sur les écosystèmes et les sociétés. Ces effets ne se produisent pas dans un cadre fixé et à l'équilibre, mais au contraire dans une société qui change constamment. Là encore, l'analyse est profondément marquée par l'irréversibilité et l'incertitude.

2.2. Il existe des possibilités techniques d'adaptation et d'atténuation.

La question du changement dans une société en mouvement se pose aussi en ce qui concerne les techniques et mesures d'adaptation et d'atténuation. Le groupe de travail II du GIEC souligne l'existence de larges possibilités d'actions efficaces fondées sur les technologies actuelles (Encadré 2.1). Un message essentiel est que le développement de nouvelles technologies, n'est pas une condition préalable à la mise en oeuvre de politiques d'adaptation et d'atténuation économiquement efficace. LE GIEC montre qu'il s'agit aussi de prendre des initiatives visant à remédier à la pénurie d'information et à surmonter les obstacles culturels, institutionnels, juridiques, financiers et économiques qui peuvent s'opposer à la diffusion des techniques et à l'évolution des comportement.

A partir de ce point et dans toute la suite de ce travail, nous nous intéresserons plus particulièrement aux mesures visant à réduire les émissions de gaz à effet de serre. Cette restriction limite toutefois relativement peu la portée de l'analyse :

- L'ingénierie planétaire, comme la fertilisation océanique par exemple, pourrait permettre d'augmenter les puits de gaz à effet de serre. Mais en ce qui concerne les décisions pour les 20 prochaines années, elle peut être laissée de côté car ses modalités d'application pratique sont encore très difficiles à cerner.
- Si les émissions et les puits de gaz à effet de serre provenant des changements dans l'usage des sols

sont aujourd'hui tout à fait significatifs, environ un cinquième des émissions totales de CO_2 en 1990, leur importance devant les émissions provenant de l'utilisation de l'énergie fossile devrait aller en diminuant au siècle prochain.

- Les aspects liés à l'usage des sols et forestiers dépendent également d'autres questions comme la biodiversité ou le développement qu'il ne nous est pas donné d'aborder ici.

Plus spécialement, nous examinerons dans cette thèse le contrôle des émissions de dioxyde de carbone provenant de l'utilisation des combustibles fossiles. Parmi les multiples gaz à effet de serre, le CO_2 est le plus préoccupant car il est émis en grandes quantités et reste très longtemps dans l'atmosphère. Bien qu'il ne soit pas possible de définir une durée de vie, le GIEC suggère l'ordre de grandeur de 120 ans pour ce phénomène. De plus, contrôler les émissions de CO_2 dépendant de l'utilisation de l'énergie fossile a aussi pour effet de contrôler les émissions des nombreux autres gaz qui en dépendent aussi.

L'effet des autres gaz peut être mesuré au moyen de l'équivalent CO_{2x}[a] . On peut donc parler de l'effet de serre en fonction de la concentration de CO_2 de deux façons:

- L'effet de serre dépend de la concentration atmosphérique de CO_2 et aussi de la concentration des autres gaz.
- L'effet de serre dépendant de la concentration de CO_2 équivalent. En fait, c'est un abus de langage, car la concentration de CO_2 équivalent est une mesure de l'effet de serre, et non pas une cause.

La réduction des émissions de CO_2 provenant de l'utilisation de l'énergie fossile est donc une question centrale du problème de l'effet de serre. D'ici 2100, le système mondial de fourniture commerciale d'énergie aura été remplacé au moins deux fois. Cela permettra de modifier le système énergétique sans réforme prématurée des équipements. D'importantes immobilisations corporelles vont également être remplacées dans les secteurs industriels, commercial, résidentiel et agricole/forestier, qui consomment de l'énergie. Ces cycles de remplacement des investissement donnent la possibilité d'exploiter des techniques nouvelles, plus performantes.

2.3. La controverse sur les dommages

A la section précédente, nous avons vu que la controverse sur la détection du changement climatique d'origine humaine était éteinte. Mais à ce jour, les scientifiques sont encore très prudents pour quantifier les effets sur les sociétés humaines. Par exemple, il n'est pas encore question d'attribuer des événements météorologiques autrefois exceptionnels mais aujourd'hui récurrents comme El Niño au changement climatique. Cette prudence ouvre le champ à des prises de positions radicales et opposées. D'un côté une association comme Greenpeace[21], par exemple considère le changement climatique comme un « Clear and Present Danger ». De l'autre, des sceptiques comme Yves Lenoir[22] soulignent « les avantages désormais tangibles de l'enrichissement en gaz carbonique » et qui rappelle en somme que les gens préfèrent en général avoir chaud que froid.

Un autre sceptique français, Pierre Naslin[23], explique en commentant une partie du dernier rapport du groupe I du GIEC que, concernant l'évolution du système climatique, *'Pour l'avenir, tous les scénarios sont possibles'*. Juste après cet exposé, il recommande de considérer l'effet de serre comme un facteur secondaire pour la gestion des combustibles fossiles. Une tel mouvement de la pensée, qui part d'une absence de visibilité du futur pour arriver à une absence d'importance ne fait il pas irrésistiblement penser à l'histoire du réverbère[b] ?

---

[a] L'équivalent CO_2 est l'augmentation de la concentration de dioxyde de carbone qui produirait un forçage radiatif équivalent à l'augmentation de la concentration des autres gaz.

[b] Un ivrogne cherche quelque chose sous un réverbère, la nuit. Un passant lui demande « Vous avez perdu quelque chose ? » Il répond « Oui, j'ai laissé tombé ma clé sur le trottoir d'en face ». « Mais alors, pourquoi vous la cherchez ici ? ». « Parce qu'ici, c'est éclairé ! ».

Le caractère diffus et retardé des impacts du changement climatique pose un véritable problème de gestion politique. La concentration de gaz à effet de serre est imperceptible, et dans certains cas, il n'y a pas non plus de perception directe des conséquences. Le manque d'eau, par exemple, peut se traduire par une augmentation des prix au lieu d'un rationnement. Les groupes humains concernés n'ont pas d'observation sensible des impacts. La médiatisation par les scientifiques est donc nécessaire, ce qui implique de nombreuses difficultés.

Le point de vue des producteurs d'énergies fossiles comme la Global Carbon Coalition force largement le trait sur l'incertitude contre un prétendu 'unanimisme climatique'. Dans son livre[24] , Yves Lenoir prétend que ce qui est donné publiquement comme les résultats d'une expertise internationale n'est qu'une imposture scientifique. Il prétend que le GIEC est partie prenante dans une coalition d'intérêts comprenant notamment les grandes organisations écologistes, les mouvements et organisations pour la maîtrise de l'énergie, ainsi que la haute technocratie. Cette coalition serait porteuse d'un projet *totalisant* visant à faire du CO_2 et des énergies fossiles les boucs émissaires d'une catastrophe annoncée. Ainsi, le lobby climatique reprendrait le relais du lobby nucléaire pour étouffer la démocratie.

Il convient d'apporter quelques commentaires à cette critique des travaux du GIEC. Ce que la communauté scientifique reconnaît avoir détecté statistiquement aujourd'hui, c'est la perturbation d'origine humaine sur le climat, et non sur le bien être des individus. Les experts reconnaissent explicitement que l'évaluation des conséquences de l'évolution du climat conduit à une fourchette large, comme nous venons de le voir plus haut. Dans certaines régions, on estime que les dommages seront élevés, alors que dans d'autres :

> *...l'évolution du climat augmentera la production économique et offrira des opportunités de développement...*[25]

Ce qui intrigue dans la position d'Yves Lenoir, c'est son optimisme: ceux qui ont froid aujourd'hui auront chaud demain, on pourra faire du vin en Suède et en Ecosse, le Sahara refleurira... Pourquoi pas, mais l'ensemble des éléments patiemment réunis sur l'évolution du climat indique plutôt des hypothèses inverses. L'évolution de la pluviométrie sur le sud de l'Europe, l'Afrique du Nord et l'Afrique Sub-Saharienne semble plutôt orientée à la sécheresse que vers l'augmentation de la pluviosité. Les observations et les modèles montrent qu'un réchauffement global, modifiant les courants marins, provoque un affaiblissement du Gulf Stream qui refroidit gravement le climat européen[26].

Imaginons abstraitement qu'un réchauffement global de 2°C soit favorable à l'espèce humaine. Deux problèmes se posent. Premièrement, c'est surtout la transition à partir du climat actuel qui concerne nos générations. L'espèce humaine s'est développée et adaptée à des conditions climatiques qui sont relativement stables : la variabilité naturelle de la température pendant le dernier millénaire est de l'ordre de 1°C[27]. Cette adaptation s'est d'abord traduite par une répartition du peuplement mondial, par l'édification de villes, de ports et autres infrastructures, par la structuration de sociétés autour de techniques agricoles, et aussi par l'accoutumance aux insectes, parasites et pathologies diverses qui accompagnent les conditions climatiques. L'adaptation à de nouvelles conditions ne sera pas nécessairement un exercice gratuit et facile, il peut au contraire s'avérer coûteux et tragique, d'autant que ces conditions ne seront pas stabilisées.

Deuxièmement, si nous ne mettons pas en place les économies d'énergie et le passage aux ressources renouvelables, conditions pour contrôler l'évolution du climat, nous risquons de dépasser largement tout 'optimum climatique'. En effet, consommer tout le potentiel techniquement réalisable de pétrole et de gaz classique, soit 300 GtC, ainsi que le quart des réserves de charbon, soit 800 GtC, conduirait dans l'hypothèse haute à un réchauffement global de 6.4 °C.

2.4. Conclusion

Le risque du changement climatique est réel et sérieux, mais ce n'est pas probablement pas le bouleversement le plus important qui va affecter la façon dont nos descendants vivront. On peut raisonnablement penser que les changements sociaux, à l'échelle de plusieurs décennies, seront au moins

aussi important que les changements climatiques. Tant pour l'atténuation que pour l'adaptation, les possibilités techniques ne semblent pas limitantes. Il semble par contre primordial de se préoccuper de la façon dont le changement du climat interagit avec le changement de la société. Cette position est illustrée dans la déclaration de Jorgenson[28] :

> *How large are the damages associated with climate change? They are equivalent to the loss of about one year of world economic growth. Obviously, this is sizable, but not overwhelming. In the view of the signatories of the Economists' Statement on Climate change, this is sufficient to justify preventive steps to reduce greenhouse gas emissions.*

Le vrai enjeu n'est pas de savoir si un léger réchauffement, inévitable compte tenu des tendances économiques actuelles, est néfaste ou non, mais de prévenir une perturbation dangereuse du système climatique. C'est ce risque qui impose de limiter au maximum le réchauffement. On ne saurait prendre prétexte des manque d'explications relatifs aux épisodes climatiques passés pour éluder notre responsabilité dans l'ajout d'une perturbation importante du système climatique.

N'envisager que des hypothèses favorables, c'est se fier à la Providence plutôt qu'à l'action humaine raisonné. Cette position, idéologique, conduit à voir le travail du GIEC comme un complot, alors qu'il s'agit d'un processus ouvert et relativement démocratique, inspiré du meilleur de la collaboration internationale en météorologie. Ces conceptions oublient le caractère profondément corporatiste de tous les défenseurs des énergies fossiles. Elles font l'impasse sur tous les coûts sociaux déjà élevés des perturbations climatiques et des usages des énergies fossiles.

3. Dynamiques socio-économiques et pressions sur le climat

Le changement qui nous préoccupe est donc l'augmentation des émissions de dioxyde de carbone provenant des combustibles fossiles. Pour décomposer le mécanisme social qui y conduit, nous utilisons classiquement l'identité dite 'de Kaya'[29] :

Equation 1
$$\text{émissions} = \text{population} \times \frac{\text{consommation de biens et services finaux}}{\text{population}} \times \frac{\text{consommation d'énergie}}{\text{consommation de biens et services finaux}} \times \frac{\text{émissions}}{\text{consommation d'énergie}}$$

Dans cette section, nous allons nous intéresser successivement à chacun des termes de cette identité. Quelles sont les tendances passées et présentes, comment pourraient se comporter ces facteurs dans le futur ? Nous allons voir que les deux premiers, la population et la richesse par personne, tendent à augmenter, mais que les deux derniers, l'intensité énergétique de la consommation (approchée en général par l'intensité énergétique du PIB) et le contenu en carbone de l'énergie, sont déjà à la baisse dans beaucoup de pays développés.

3.1. L'accroissement de la population.

On peut se demander pourquoi les aspects concernant la démographie sont ne sont pas au centre des débats sur l'effet de serre, pourquoi la plupart des modèles d'évaluation intégrée (dont celui qui va être développé dans cette thèse) considèrent la population future comme une donnée ? Nous allons en effet voir dans cette section que l'accroissement de la population mondiale est une variable fondamentale pour le changement climatique. Mais nous allons aussi montrer que cette question présente aussi un risque de manipulation et qu'elle soulève rapidement des aspects encore difficile à étudier.

⇒ *Un problème réel*

Le scénario central des Nations Unies[30] évalue la population mondiale en 2050 à 9,83 milliards d'individus dans sa variante médiane. Dans ce scénario, l'augmentation de la population est due en grande partie aux pays en développement dont la population passerait de 4,1 milliards en 1990 à 8,6 milliards en 2050. Pendant cette période, l'Afrique verrait sa population multipliée par 5 (0,63 à 2,14), l'Amérique du Sud par 2 (0.4 à 0.8), un peu plus que l'Asie qui passerait de 3,2 à 5,7. A contrario, l'Amérique du Nord, l'Europe et l'ex-URSS verraient leurs populations se stabiliser assez rapidement. Après 2025, les Nations-Unies prévoient même une baisse de la population en Europe.

Le chiffre des Nations Unies est proche de celui de l'IIASA[31], qui évalue à 9,87 milliards d'habitants la population globale en 2050. Toutefois, le Tableau 2.1 permet de se rendre compte des marges d'incertitude concernant ces résultats.

A terme 2030, les *projections* sont relativement précises, puisque la majorité de la population adulte de cette époque est déjà née. A long terme, de nombreuses sources d'incertitude apparaissent, et le tableau montre que les variantes diffèrent de l'ordre de 100% sur la variation de population d'ici la fin du siècle prochain. C'est pourquoi au delà de 2050, Lutz[32] parle *d'extensions à usage illustratif.*

	fertilité et mortalité basses	cas central	fertilité et mortalité élevées
1995	5,7	5,7	5,7
2010	6,8	7,0	7,2
2020	7,5	7,8	8,2
2050	8,5	9,9	11,3
2100	6,5	10,3	15,1

Tableau 2.1 : Taille de la population mondiale dans trois scénarios.

Milliards d'habitants. Source IIASA, 1996.

Au total, on s'attend à un accroissement très sensible de la population globale d'ici 2050 dans toutes les variantes. Du point de vue des émissions de gaz à effet de serre, le problème est donc réel, puisque nous avons vu que seule une diminution significative des émissions était compatible avec la stabilisation des concentrations.

⇒ *Dangers d'une lecture partiale des chiffres*

Toutefois, il ne s'agit là que de scénarios, de prospective, et en aucun cas de prévisions. Lorsque l'on produit de tels chiffres concernant les phénomènes à long terme, le risque de déformation du message est très grand. Trop souvent, certains médias ne retiennent, ou ne transmettent de tels exercices que le chiffre central et les conclusions qualitatives. Or il est important de se souvenir que les conclusions ne sont en fait que des hypothèses spécifiques correspondant au scénario dit 'central' par les auteurs. Mais alors, quelle est la fonction de telles projections à long terme de la population du monde ? Pour Le Bras[33] :

> *Il ne s'agit pas de tenter de comprendre ce qui se passera réellement, et qui est hors d'atteinte de l'esprit humain ou supposerait un grave manque de liberté des humains, mais de réorganiser dans un tableau cohérent un ensemble de phénomènes incompréhensibles ou inquiétants, un malaise de civilisation....: offrir un système pour penser les évolutions confuses de l'heure présente.*

En lisant les projections actuelles, Le Bras y voit le message que : *« la portion la plus dangereuse de l'humanité est formée des pauvres d'une autre race »*. En effet, selon les scénarios centraux de population et d'émission IIASA/WEC, dans la prochaine moitié du siècle l'OCDE aura vertueusement réduit sa pollution, alors que les autres pays auront doublé leur part. Nous verrons plus loin (Tableau 2.2 page 70) l'importance de la part des pays en développement dans les émissions futures de CO_2 . La position de Le Bras constitue ici un rappel salutaire de la relativité des projections. Voir dans le problème de l'effet de serre plus un danger venant de la prolifération du Sud qu'une conséquence des comportements passés du Nord présente le grave danger intellectuel de catégoriser le monde en deux[a], d'autant plus qu'il existe parfois des inégalités importantes à l'intérieur même des pays.

⇒ *Des aspects théoriques difficiles.*

Nous venons de voir que la question démographique présentait de grands risques de manipulation. Or la question est tout aussi épineuse au plan théorique, puisqu'on peut directement la relier aux idées originales de Malthus[34].

Dans telle une relecture des problèmes de changement global, la rareté de la ressource "environnement" pourrait prendre la place de la ressource "vivres". Nous venons de constater plus haut que dans tous les scénarios envisagés, la population mondiale s'accroissait à un taux positif, donc très supérieur à celui nécessaire pour stabiliser la concentration des gaz à effet de serre. Le *principe de population* est donc lui aussi vérifié. La question de la prudence permettant d'éviter l'intervention des autres facteurs limitants, le vice ou la misère, reste donc d'actualité. Et cette question est toujours aussi brûlante.

En conséquence nécessaire de la prudence, Malthus a été conduit à désavouer publiquement le droit des pauvres à être entretenus aux frais de la société. En effet, si les pauvres ne supportaient pas eux mêmes la charge qu'ils représentent pour l'économie, l'inefficacité qui en résulterait aurait des conséquences néfastes pour tous : l'accroissement sans limite de leur nombre.

Dans le cas du changement climatique, le raisonnement s'applique plutôt à l'échelle des pays. Les pays riches ne sauraient envisager que le développement des pays pauvres est un droit, mais cela ne

[a] Concernant les émissions en 1990, on peut consolider le total des pays de l'OCDE d'une part, et les pays non OCDE d'autre part. Mais projeter ces chiffres à 2050 est relativement pernicieux, puisqu'en 2050, le niveau de développement économique et social dans la plupart des pays aura changé. Dans la pratique de l'agrégation des données disponibles, ce problème de périmètre est déjà actuel puisque l'OCDE (incluant le Mexique et la Corée) ne correspond pas aux pays de l'Annexe II de la Convention Climat.

clôt pas la question. On peut en effet argumenter qu'il serait économiquement efficace que les pays en développement supportent le coût marginal de leurs émissions, et s'interroger sur les conséquences à en déduire.

De plus, les pays riches peuvent aider les autres dans le développement de leur système énergétique. Le raisonnement malthusien contribuer à justifier que dans le cas du Fonds pour l'Environnement Mondial, l'aide ne porte en général que sur la portion d'investissement qui permet d'améliorer le projet du point de vue de l'environnement global et qui n'aurait pas été réalisée en l'absence d'aide.

Toutefois, cette amélioration du point de vue de l'environnement global peut sembler difficile à quantifier. En effet, les projets sont susceptibles d'avoir des incidences à long terme non seulement sur la croissance de la population, mais aussi sur toute l'économie et la consommation des diverses sources d'énergie. Etre certain qu'une aide ne va pas augmenter les émissions nettes d'un pays est aussi une question difficile.

⇒ *Conclusion*

En conclusion, comme le montre la Figure 2.12, les tendances démographiques sur les dernières décennies, ont été à une hausse relativement régulière. En conséquence, à l'horizon de deux générations, les incertitudes à long terme en valeur relative sur les populations sont peut être moindres que celles sur la sensibilité climatique abordée plus haut. Mais ce que nous venons de voir permet de comprendre que les controverses scientifiques n'en sont pas moins vives.

L'examen des relations futures réciproques entre la population et le changement climatique peut vite se colorer de subjectivité. Il est aisé de charger les pays en développement de l'essentiel du problème de l'effet de serre dans le futur, alors que c'est bien la minorité des habitants des pays riches qui contribue pour l'essentiel à la pollution actuelle. Nous reviendrons plus bas sur les implications des aspects démographiques régionaux pour les perspectives de réduction des émissions de gaz à effet de serre.

En conclusion, il convient de se méfier à la fois des présentations tendancieuses et des dénégations vertueuses d'un problème réel. Peut être cette méfiance explique t elle en partie pourquoi la plupart des modèles d'évaluation intégrée n'endogénéisent pas l'évolution de la population. Jusqu'à présent, la recherche s'est plus concentrée sur l'analyse les termes suivants de l'identité dite de Kaya.

Figure 2.12 : Evolution de la population et de la richesse par régions du monde.

A gauche, l'évolution de la population en milliards d'habitants . A droite, l'évolution du Produit Intérieur Brut dans le monde ces trente dernières années. Les chiffres sont calculés à parité de pouvoir d'achat, c'est à dire que les taux de conversion entre les monnaies ne dépendent pas des fluctuations financières mais reflètent bien la situation d'accès aux biens et services réels. NAM: Amérique du Nord, EUR: Europe occidentale, PAO: OCDE du Pacifique, SAM: Amérique du Sud, ASI: Asie, EEU: Europe de l'est, AFR: Afrique. Source ENERDATA.

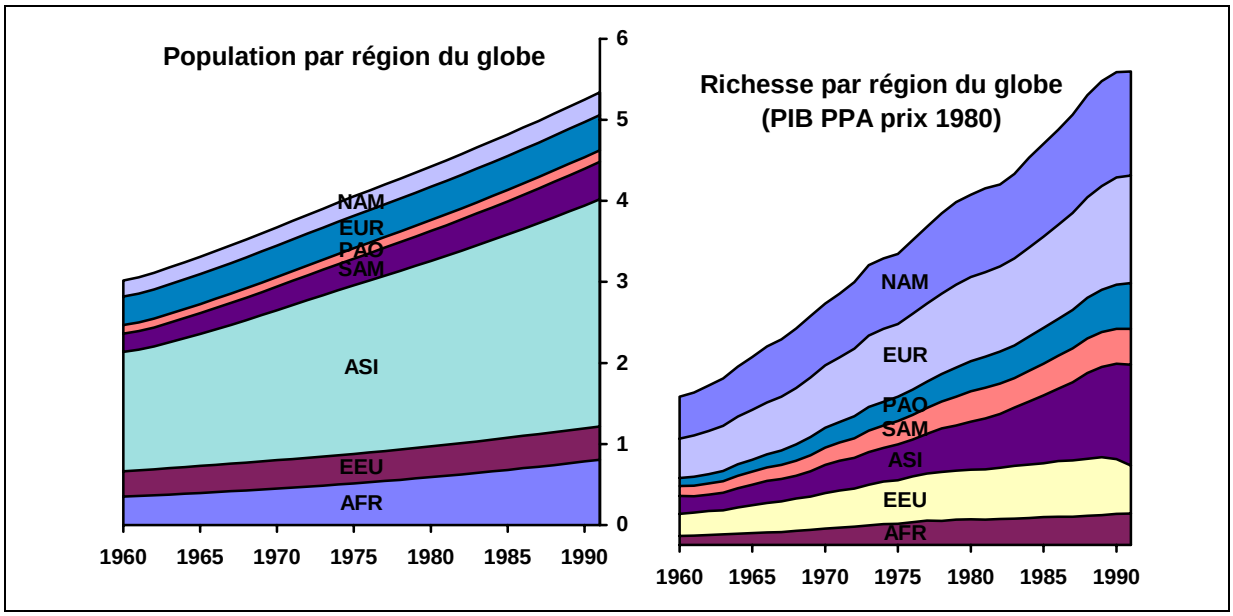
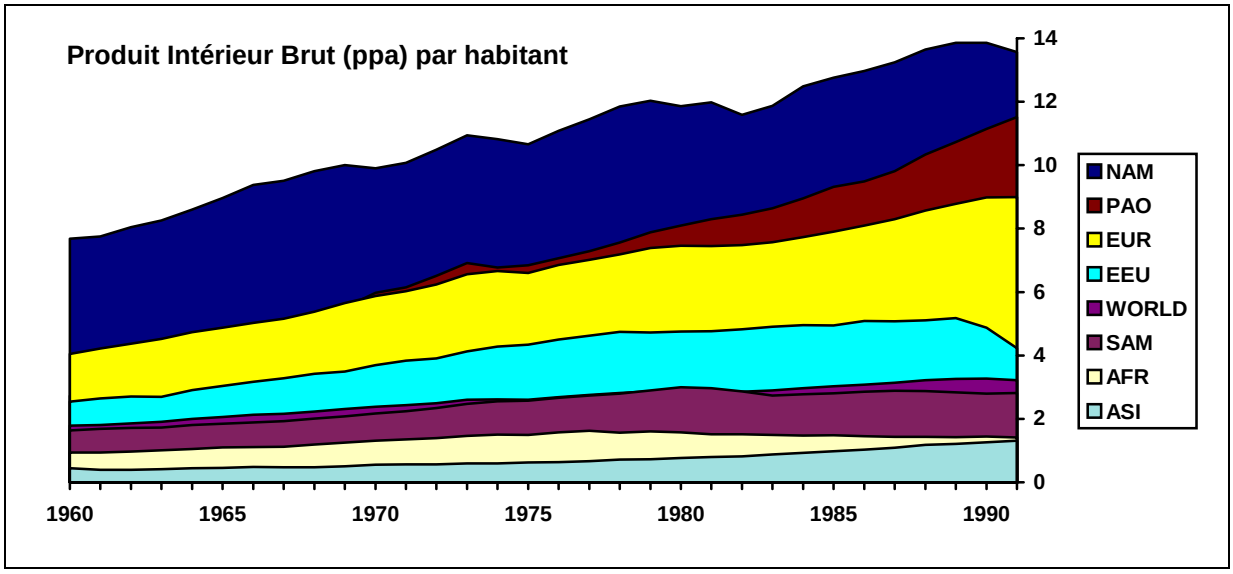


Figure 2.13 : Evolution du PIB par habitant par région du monde depuis 1960.

Produit Intérieur Brut par habitant en milliers de dollars US1980 parité de pouvoir d'achat, source ENERDATA. NAM: Amérique du Nord, EUR: Europe occidentale, PAO: OCDE du Pacifique, SAM: Amérique du Sud, ASI: Asie, EEU: Europe de l'est, AFR: Afrique.



3.2. Croissance et développement durable

Nous venons de montrer en quoi les questions démographiques sont actuellement hors du champ de l'étude que nous allons proposer dans la suite. Concernant le second terme de l'Equation 1, la croissance économique est aussi une variable clé des émissions de gaz à effet de serre. Mais la question du développement durable[a, 35] dépasse elle aussi le cadre que nous nous sommes fixés.

La Figure 2.12 montre que la richesse globale a augmenté considérablement, plus rapidement que la population. Le pouvoir d'achat d'un habitant de la planète moyen a augmenté. La Figure 2.13 montre la croissance de ce pouvoir d'achat moyen par région sur les trente dernières années. La croissance actuelle pourrait sembler ne pas tendre au développement durable : la pollution existe, des réserves minérales s'épuisent. Et l'augmentation du nombre de maisons, de routes ou de centrales électriques par exemple contribue directement à l'augmentation des émissions polluantes.

On comprend donc qu'une variation de 1 point de la croissance à long terme ait des conséquences très importantes sur la quantité de gaz à effet de serre émis. Cela implique que poser le problème du changement global comme dans DICE[36] de W. Nordhaus, c'est à dire en intégrant à la fois la croissance et l'environnement, c'est poser la question d'un arbitrage entre ces deux termes.

Pour mesurer la durabilité de la croissance, certains économistes définissent et mesurent un PIB "vert", qui prend en compte la variation du stock de patrimoine naturel. Malheureusement, cette façon de répondre à la question n'a pas encore eu toute l'ampleur ni le succès qu'elle méritait. En somme, les outils empiriques appropriés manquent.

Toutefois en théorie, la durabilité n'est pas impossible à atteindre[37]. Le concept de ressources épuisables n'est pas si précis qu'il peut sembler au premier abord, les réserves dépendant des conditions techniques et économiques à une date donnée. L'accumulation du capital artificiel, matériel mais aussi humain, permet aussi d'utiliser plus efficacement les ressources futures.

La production de gaz à effet de serre n'est pas une fin en elle même, mais un effet secondaire indésirable de la production de certains services comme le transport, le chauffage ou la fabrication de ciment. Mais il existe encore à l'heure actuelle de nombreuses définitions différentes de la durabilité[38].

On le voit, les économistes ignorent encore beaucoup de choses à la fois sur la notion même de durabilité et sur l'environnement, et se posent encore beaucoup de questions sur les mécanismes de la croissance à long terme. De plus, les résultats des modèles du type évoqué montrent qu'il est possible de réduire largement les émissions sans oblitérer significativement la croissance. C'est pourquoi il nous a semblé plus fructueux dans la suite et en particulier dans le modèle développé, de nous concentrer sur d'autres aspects du problème du changement climatique que l'arbitrage entre l'environnement et la croissance.

On peut toutefois retenir qu'en principe, rien ne s'oppose à ce que les hommes accèdent au confort et à la richesse en polluant moins. C'est ce que nous allons confirmer dans la suite en examinant en pratique le découplage énergie/croissance et la dématérialisation.

3.3. Le découplage énergie-croissance

Les deux sections précédentes nous ont permis de montrer que freiner la croissance démographique ou économique contribuerait à modérer le changement global, mais que nous n'allons pas étudier de telles politiques ici. Les mesures concrètes auxquelles notre travail se rapporte concernent plutôt l'intensité énergétique du PIB et le contenu en carbone de l'énergie. Dans cette section, nous allons voir maintenant que l'état actuel des connaissances permet d'envisager une baisse volontairement accélérée de l'intensité énergétique, permettant de réduire significativement les émissions malgré les deux croissances évoquées plus haut.

---

[a] Le mot anglais est *sustainable development*, d'où l'anglicisme *développement soutenable*. Il est définit comme « *un développement qui répond aux besoins du présent sans compromettre la capacité des générations futures à de répondre aux leurs* ».

La Figure 2.14 montre l'évolution de l'intensité énergétique du PIB sur la longue période pour cinq pays développés. On voit que la tendance actuelle est à la décroissance, après être passé par un maximum. Cela est usuellement expliqué en distinguant un effet de changement structurel et un effet de progrès technique.

- On comprend bien la décroissance actuelle en considérant que dans nos pays post industrialisés, une plus grande part de l'accroissement du bien-être provient de la production de services immatériels : c'est le changement structurel. D'autres observations confirment l'idée selon laquelle l'intensité énergétique des pays, au cours de leur développement économique, décrirait une courbe passant par un maximum. (Martin, 1988).
- Sur la Figure 2.14, on observe aussi que le maximum historique atteint par des pays industrialisés plus récemment est plus bas que celui des pays industrialisés plus tôt. Le maximum du Japon, par exemple, est inférieur au maximum de l'Allemagne. Cette remarque aussi est confirmée par d'autres observations. La décroissance des pics successifs correspond au progrès technique général.

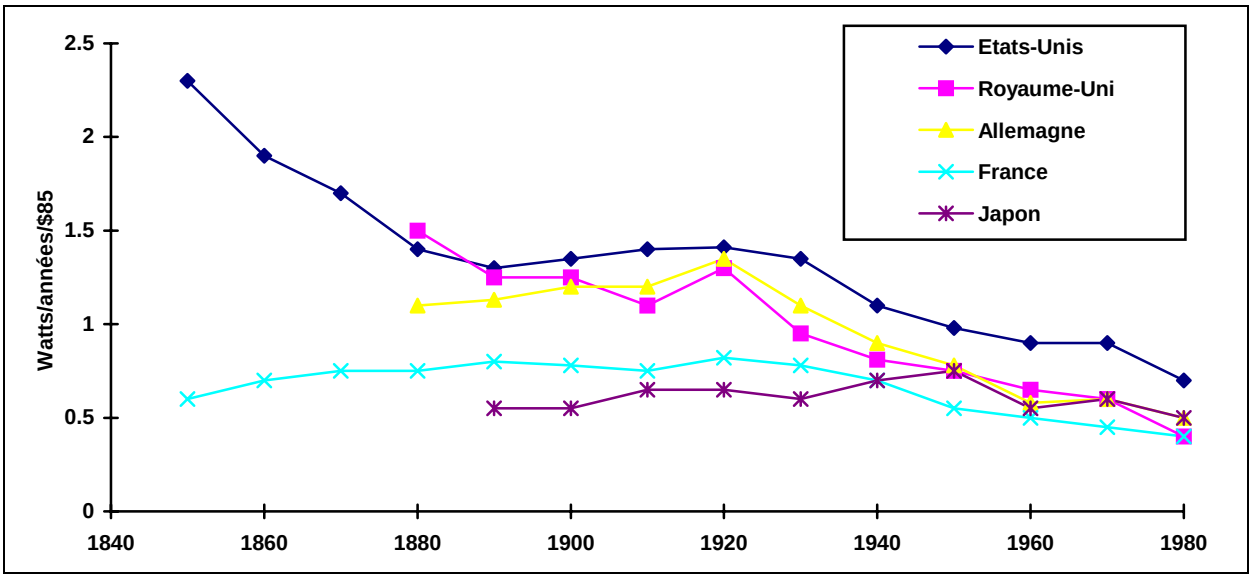


Figure 2.14 : Evolution historique de l'intensité énergétique commerciale.

L'intensité énergétique est le ratio de la consommation énergétique sur la consommation de biens et services finaux. C'est le troisième terme de l'identité dite de Kaya, la quantité d'énergie qu'il faut pour produire une unité de richesse moyenne. Par exemple, on mesure le nombre de sacs de charbon qu'il faut pour faire un lingot de fer. Notons que la mesure concerne ici les formes d'énergies commerciales. Si on inclut la biomasse, les courbes sont monotones décroissantes. Source Grübler (1989), Nakicenovic (1986) et Martin (1988), d'après Chapuis (1996).

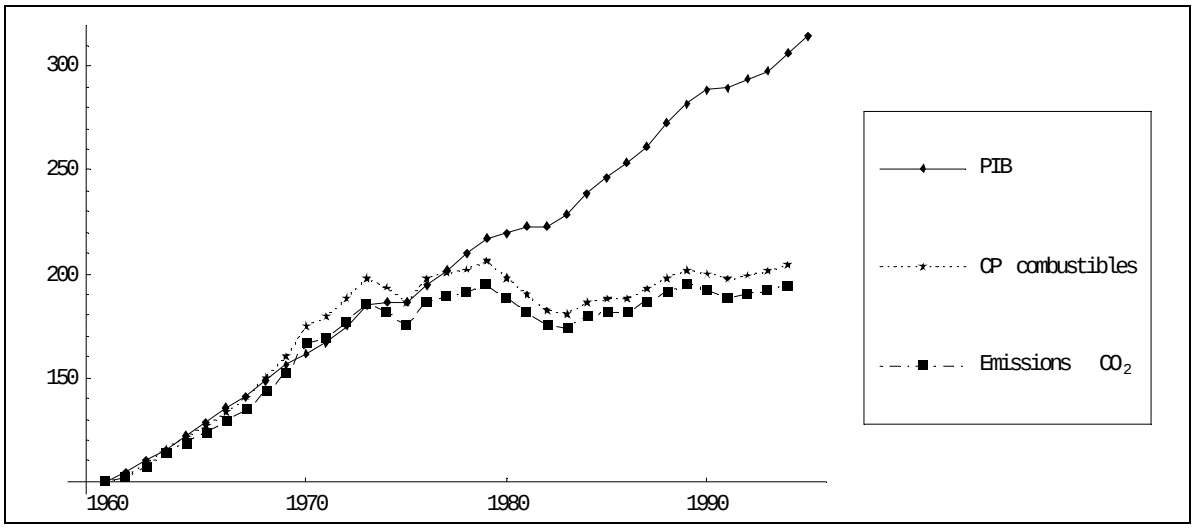


Figure 2.15 : Découplage énergie-croissance dans les pays de l'OCDE.

Base 100 en 1960. Source : Enerdata.

Cela explique comment la production de richesses peut augmenter sans que la consommation d'énergie suive le même chemin. Il semble que c'est bien le cas dans les pays de l'OCDE depuis le milieu des années 70. La Figure 2.15 illustre ce découplage. On constate toutefois que le rythme actuel de dématérialisation semble insuffisant pour conduire à des réductions sensibles des émissions de gaz à effet de serre dans un délai proche.

D'un point de vue moins agrégé, plusieurs études indiquent que dans de nombreuses régions du monde, le rendement énergétique peut être accru de 10 à 30% à un coût négatif ou nul par rapport au niveau actuel dans les secteurs industriels, des transports ou de l'habitat, grâce à des mesures techniques d'économie et à l'amélioration des pratiques de gestion au cours des 20 à 30 prochaines années (M.J. Grubb, 1996). En utilisant les techniques qui, actuellement, fournissent la plus grande quantité de service énergétique pour un apport d'énergie donné, il serait techniquement possible, dans les mêmes pays, d'aboutir à des gains d'efficacité de 50 à 60% pendant la même période.

En conséquence, il est réaliste de vouloir agir sur l'intensité énergétique pour diminuer significativement les émissions. Bien que de grands progrès aient été observés, les perspectives d'amélioration de l'efficacité énergétique dans le monde restent encore importantes.

Pour les pays développés, la diminution des émission évoquée plus haut signifie une baisse en termes absolus de la consommation énergétique. Mais pour les autres elle ne peut s'entendre que relativement à ce que les émissions auraient pu être en l'absence de politiques spécifiques. Dans ces pays, l'installation de nouveaux équipements rendus nécessaires par la croissance de la population et de la richesse augmentera nécessairement le niveau des émissions. On peut néanmoins concevoir ces équipements de manière à ce qu'au cours de leur cycle de vie, ils induisent des économies d'énergie notables par rapport à ce qu'a pu être le chemin de développement suivi par les pays de l'OCDE. Ce besoin d'équipements nouveaux peut donc aussi être vu comme une opportunité.

3.4. Le contenu en carbone des énergies

Promouvoir une utilisation plus efficace de l'énergie en général est nécessaire mais certainement insuffisant pour limiter les émissions de gaz à effet de serre[39]. L'énergie reste un facteur de production parmi les plus importants, et on envisage difficilement une diminution notable de sa consommation à moyen terme, même dans un scénario de grande efficacité énergétique, le scénario C1 de l'IIASA illustré Figure 2.16 par exemple.

Il existe toutefois des différences notables dans le contenu en carbone des différentes sources possibles d'énergie. A énergie produite égale, le gaz naturel émet moins de CO_2 que le pétrole, lui même

plus propre que le charbon[a]. Agir sur la composition du mélange des sources d'énergie primaire (en anglais *energy mix*) constitue donc l'autre idée directrice des politiques visées ici, qui peuvent s'articuler en trois volets.

- Le premier concerne la substitution entre les combustibles fossiles. Nous avons au chapitre précédent que la ressource est considérée comme largement suffisante à l'échelle du siècle. consommer tout le potentiel techniquement réalisable de pétrole et de gaz classique, soit 300 GtC, ainsi que le quart des réserves de charbon, soit 800 GtC, conduirait dans l'hypothèse haute à un réchauffement global de 6.4 °C. Accroître l'utilisation du gaz naturel au siècle prochain est donc une mesure susceptible de modérer le changement climatique, à condition que les fuites de méthane soient bien maîtrisés.
- Le second concerne les énergies renouvelables (énergie solaire, énergie hydroélectrique, énergie éolienne, biomasse traditionnelle et moderne, énergie thermique des mers, par exemple). Celles ci en sont à divers stades de développement technique et de maturité commerciale, mais on s'attend à des réductions de coût importantes dans les prochaines décennies[40]. La vision de leur rôle dans le futur est difficile à préciser, toutefois il est clair que leur potentiel n'est pas complètement exploité.
- Le troisième point concerne l'énergie nucléaire. Représentant actuellement environ 5% de l'énergie primaire produite (17% de l'électricité), c'est une technologie exploitée depuis plusieurs dizaines d'années dans de nombreux pays. Cependant, son utilisation pose des problèmes d'acceptabilité sociale, comme celui du choix des sites et la méfiance relative aux accidents; des problèmes politiques comme le risque de prolifération des matières fissiles, et des problèmes écologiques comme le démantèlement et stockage des déchets. Des recherches actuelles visent à rendre son utilisation plus intrinsèquement sûre[41], mais pour d'autres les perspectives concernant le coût de l'énergie nucléaire à moyen terme sont moins optimistes que celles concernant les énergie renouvelables.

Comme le montre la Figure 2.16, on s'attend à ce que les combustibles fossiles constituent encore la source majoritaire d'énergie pour les prochaines décennies, mais que leur contenu en carbone tend à diminuer. Cette idée provient notamment de l'analyse du passé représenté Figure 2.17, et du fait que dans beaucoup de pays, il existe déjà une volonté consciente d'utiliser davantage de gaz naturel à la place du charbon[42]. Toutefois, on peut voir Figure 2.16 qu'il serait nécessaire d'aller bien au delà des tendances actuelles (scénario B) pour éviter un doublement des émissions d'ici 2050.

[a] Une façon de comparer les divers combustibles consiste à calculer le rapport du nombre d'atomes de carbone sur le nombre d'atomes d'hydrogène dans une quantité donnée de combustible. Le bois est le plus riche en carbone, avec un ration C:H de l'ordre de 10, puis viennent le charbon (C:H ≈ 1), le pétrole (C:H ≈ 1:2) et enfin le méthane (C:H ≈ 1:4)

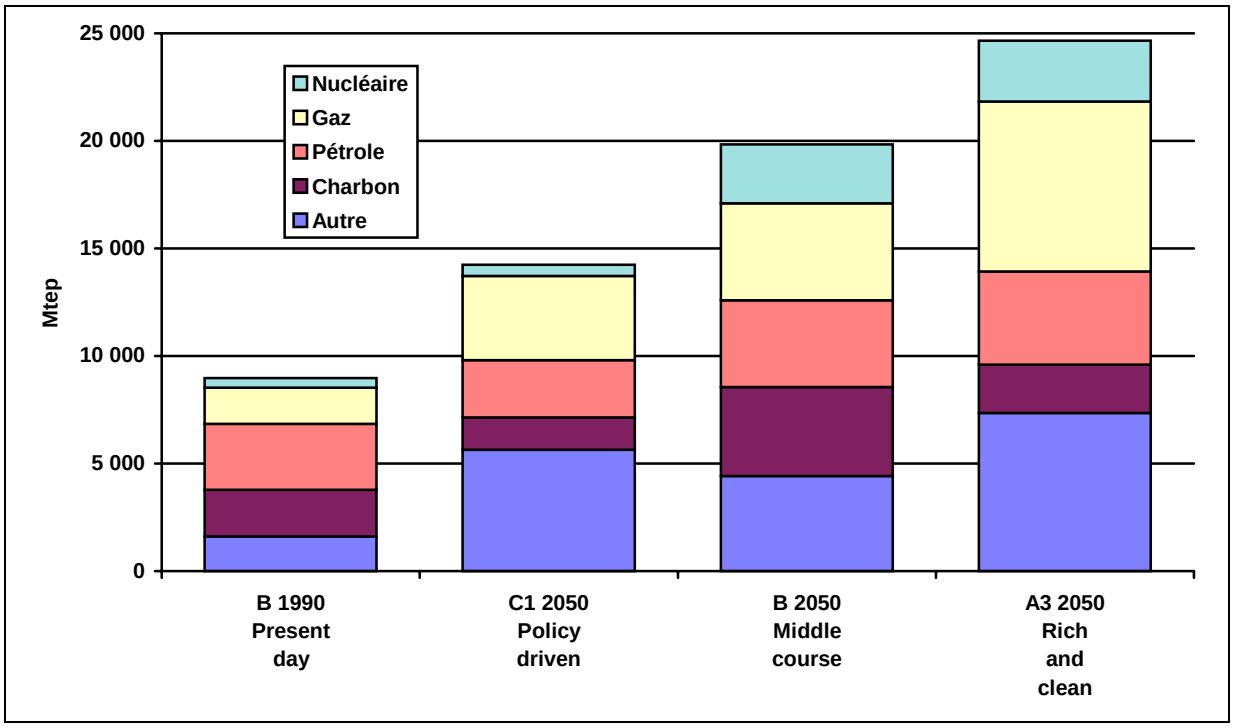


Figure 2.16 : Evolutions possibles des parts de différentes sources d'énergie.

Consommation mondiale d'énergie primaire par source, en 1990 et en 2050. Source: WEC/IIASA 1995.

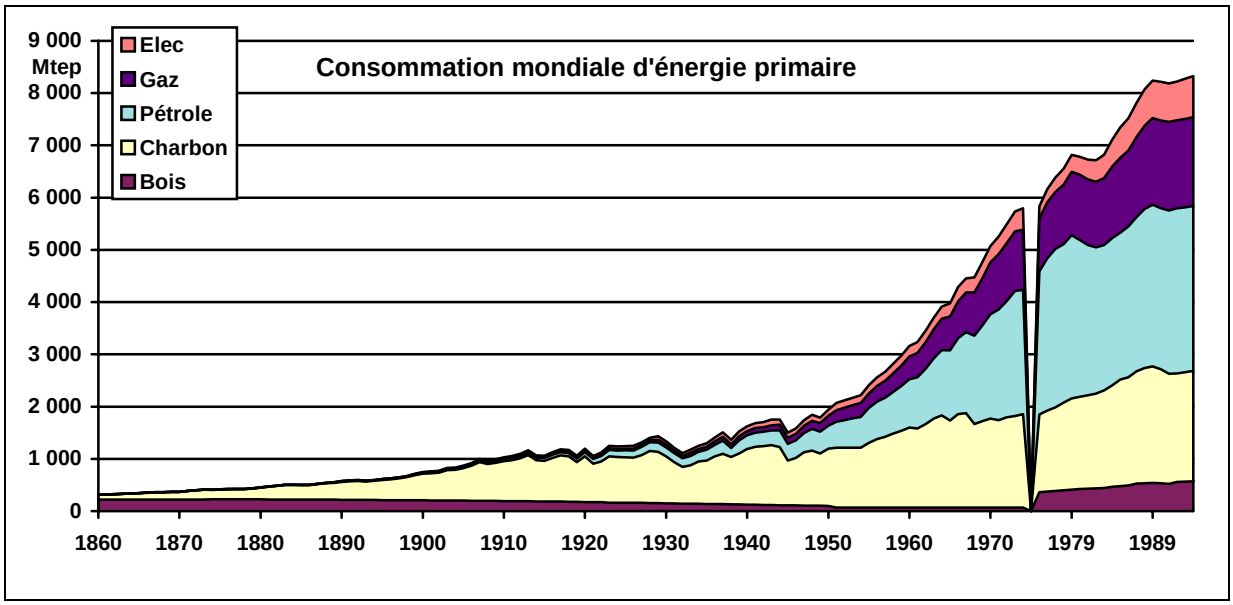


Figure 2.17 : Consommation mondiale d'énergie primaire par sources, 1860-1994.

La discontinuité en 1974 reflète que les données 1860-1974 proviennent de l'IIASA, celles sur 1974-1995 de ENERDATA. La qualité données est variable, l'évaluation de la biomasse restant problématique, et la conversion de l'électricité l'hydro et nucléaire en énergie primaire étant conventionnelle. On observe toutefois que la part relative des combustibles les plus riches en carbone tend à décroître avec le temps. La période de domination du charbon a coïncidé avec l'expansion du chemin de fer, de l'acier et de l'électrification des usines. Dans les années 1960, la prédominance du pétrole a coïncidé avec le développement du transport automobile, de l'industrie pétrochimique, et du chauffage domestique au fioul. En prolongeant ces tendances par un modèle logistique, Nakicénovic (1979) projette que le gaz naturel sera la source d'énergie prédominante au siècle prochain, le pétrole conservant toutefois la seconde place jusque dans les années 2020.

3.5. Conclusion

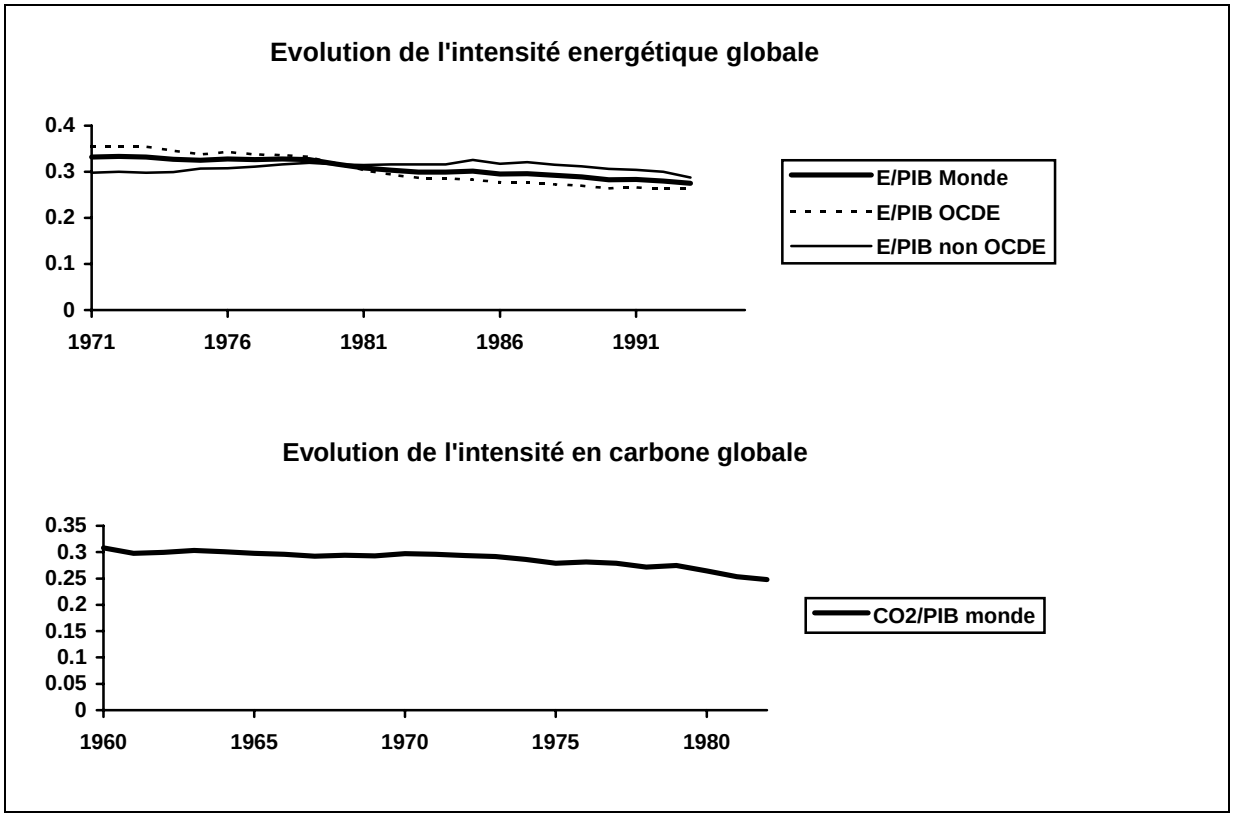
En résumé, les conditions socio-économiques du problème sont marquées par l'opposition entre la croissance (démographique et économique) et le progrès technique. Ce dernier, peut être entendu comme la décroissance du ratio CO_2 / PIB . En première approximation, on peut étudier à la place le ratio E / PIB, ce qui a l'avantage de se ramener à problème étudié depuis longtemps, celui de l'intensité énergétique du PIB, mais l'évolution du contenu en carbone des formes d'énergie (ratio CO_2 / E) est aussi importante.

La Figure 2.18 illustre l'existence d'un tel progrès technique : l'intensité en CO_2 du PIB mondial a diminué d'environ 1/6 en 20 ans, soit une baisse de l'ordre de moins de 1% par an. Compte tenu de l'augmentation du PIB et de celle de la population, il est aisé de conclure que à l'évidence que, sans mesures politiques spécifiques, le progrès technique fera suffisamment progresser l'efficacité énergétique pour stabiliser les émissions.

On peut donc conclure qu'en l'absence de politiques spécifiques, il se produirait quand même un certain progrès technique, le taux de pollution baisserait « naturellement », mais pour éviter les interférences sérieuses avec le climat, il serait nécessaire d'accélérer le progrès technique au delà de ce taux « naturel ». Toute la thèse est à propos de cette accélération.

Figure 2.18 : Evolution de l'intensité énergétique du PIB.

Intensité énergétique du PIB en Mtep d'énergie primaire par G$90ppa, pour le monde, l'OCDE et les pays non OCDE (données Enerdata). Intensité en CO_2 du PIB exprimé en GtC industriels par G$90ppa, (données CDIAC)



4. La répartition internationale des efforts, entre efficacité et équité.

Au delà des aspects globaux auxquels cette thèse est consacrée, l'examen du tableau contextuel ne serait pas complet si nous n'évoquions pas la question des négociations internationales autour des objectifs de réduction des émissions. Il a été démontré par Heal, Chichilnisky, Starret, Hourcade[43], que, dans le cas d'un bien public produit de façon décentralisée, la séparabilité entre efficacité et équité n'est plus assurée si on raisonne dans un schéma d'équilibre général et par rapport à la maximisation du bien-être collectif (au lieu d'un optimum partiel minimisant les coûts techniques de réduction). Or la communauté internationale devra discuter d'une différentiation des objectifs de réduction des émissions sur le long terme au sein des pays de l'OCDE tout d'abord (pour après 2008) entre pays de l'OCDE et pays en développement ensuite.

Il peut sembler a priori patent que la répartition internationale des efforts pose un dilemme entre efficacité et équité. En effet, comme nous allons le rappeler d'abord, les pays riches sont responsables de l'essentiel du stock de gaz à effet de serre accumulé actuellement dans l'atmosphère. En équité, cela implique qu'ils agissent en premier, et ce point est aussi reconnu en droit avec le principe de responsabilité commune mais différenciée. Cependant, comme nous allons le voir ensuite, on peut penser que le coût marginal pour réduire les émissions de gaz à effet de serre est plus faible dans les pays en développement. Il pourrait donc être efficace d'agir d'abord dans ces pays. Nous examinerons dans un troisième temps les conséquences de ce message, illustré par cette déclaration du PDG d'Elf Aquitaine[44] :

> *« Eliminer une tonne de CO_2 nous coûte 30 francs en Guinée contre 230 en France. »*

4.1. Actuellement, le poids de l'Annexe I[a]

La Figure 2.19 montre clairement que les pays riches sont responsables de la large majorité des émissions actuelles. Les plus gros émetteurs sont les Etats Unis, la fédération Russe, la Chine, le Japon et l'Allemagne. Toutefois, ce classement politique recouvre des réalités économiques extrêmement variées. Pour mieux approcher ces réalités la Figure 2.21 reprend les termes de la décomposition dite de Kaya utilisée au paragraphe précédent. Elle situe les pays en terme de population, PIB par habitant, intensité en CO_2 du PIB.

On voit alors la décomposition du monde entre les pays de l'OCDE, riches ; les pays en transition, caractérisés par une intensité énergétique du PIB élevée ; et les pays en développement. Parmi les premiers, on peut noter que la France et le Japon ont une efficacité en carbone élevée (pouvant être expliquée par leur parc électronucléaire), contrairement aux USA, au Canada, à l'Australie et à Taiwan. En termes d'émissions par tête, explicitées en tonnes de carbone par habitant par an Tableau 2.4, il existe de grandes inégalités. Ces inégalités ne sont pas seulement entre le Nord et le Sud, l'Amérique du Nord étant à 5,8 soit dix fois plus que les pays en développement. Elle existe aussi à l'intérieur même de l'Annexe I, puisque un américain moyen cause deux fois et demi plus d'émission qu'un européen.

[a] L'Annexe I est un terme utilisé pour désigner les pays listés à l'Annexe I de la Convention Climat. Il s'agit des pays de l'OCDE, moins le Mexique, plus les pays en transition vers une économie de marché.

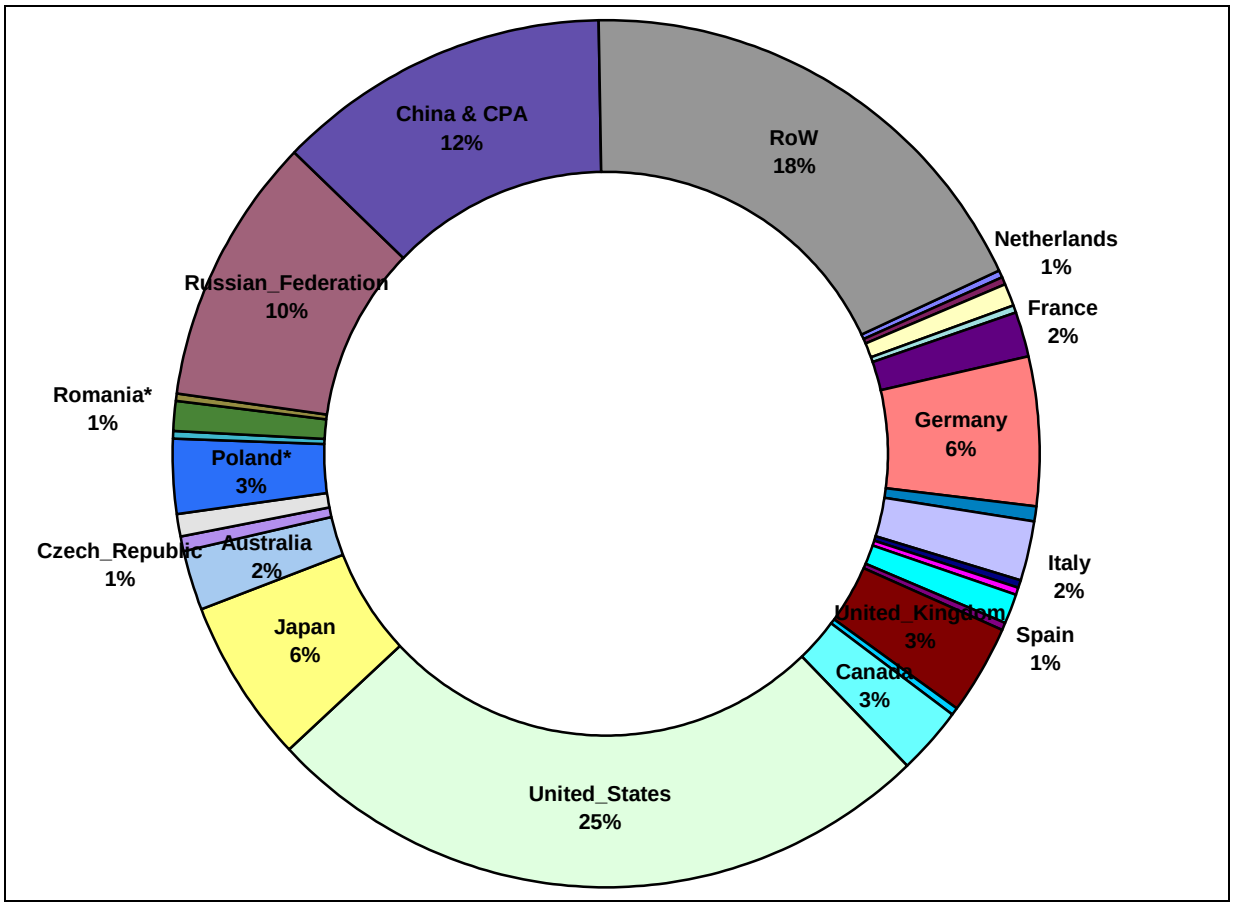


Figure 2.19 : Répartition politique des émissions de CO_2 en 1990.

Instantané des émissions de CO_2 en 1990, arrondi à l'entier le plus proche. L'Inde est agrégée avec la zone "RoW", ('Rest of the World' en anglais). Inférieurs à 1% non montrés. Source: Communications Nationales (pays développés), estimations GIEC (autres)

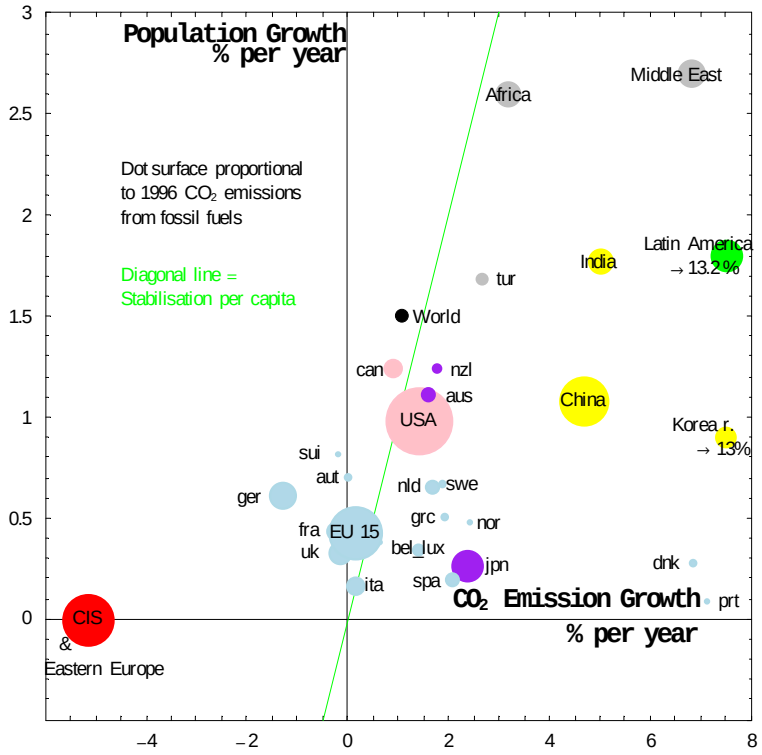


Figure 2.20 : Croissance des populations et des émissions.

Les coordonnées représentent les variations entre l'année 1990 et l'année 1996. Des variations exceptionnelles ont donc un impact pour les chiffres de certains pays. Par exemple, des événements climatiques ont contraint le Danemark à utiliser davantage de charbon en 1996. Source: Données Enerdata et CME.

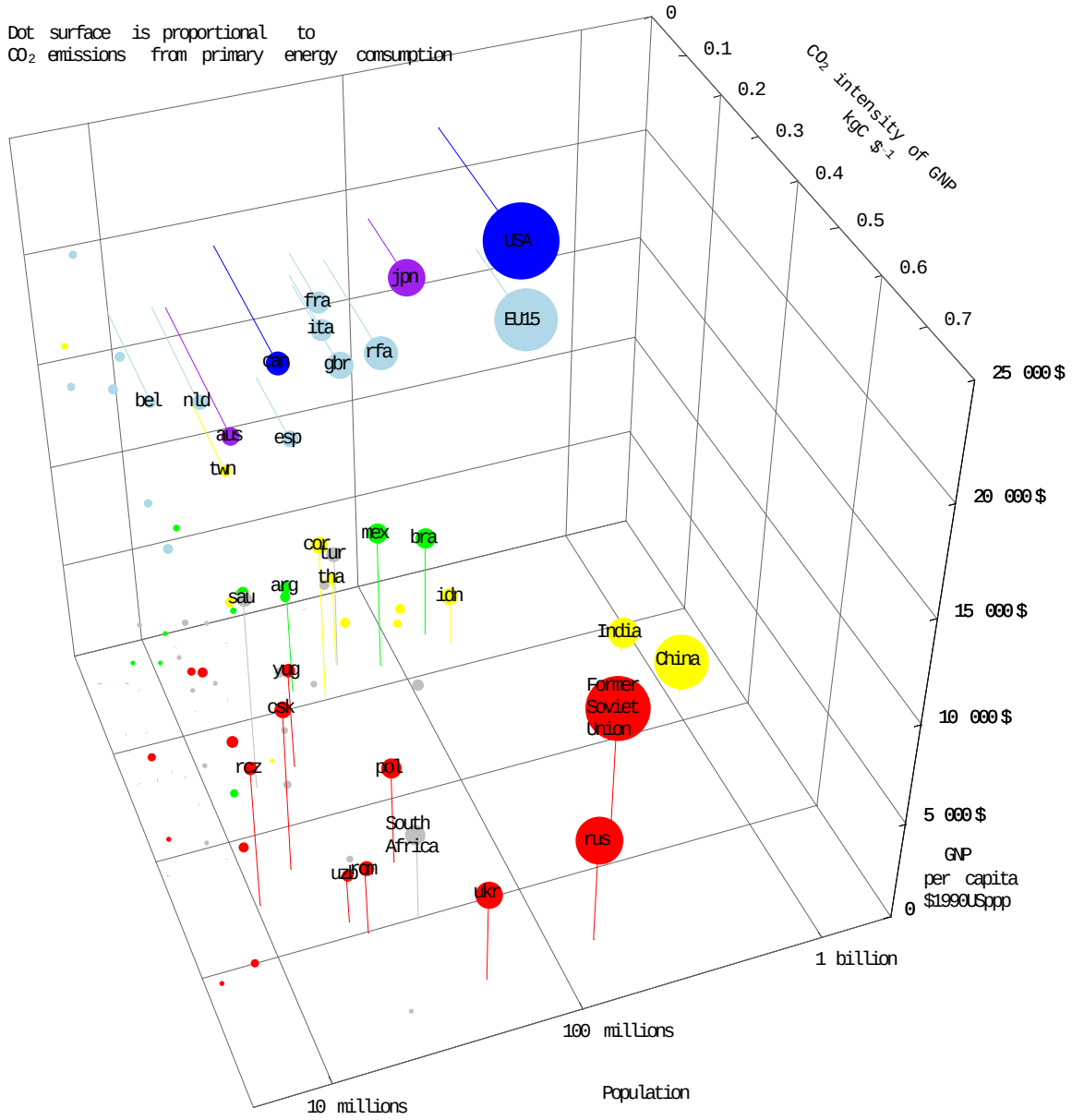


*Figure 2.21 : Par pays, Emissions=population*PIB per capita*intensité en CO_2 du PIB*

Source: données ENERDATA.

Examinons maintenant les tendances d'évolution. Dans la Fédération Russe, la forte diminution des émissions nettes de CO_2 n'est pas seulement due à une population en recul, mais aussi à la crise d'une économie en réforme profonde. En Allemagne, les émissions sont aussi en baisse sur la dernière décennie, avec la réunification et un effet semblable de restructuration conséquente de pans entiers de l'économie à l'est.

Le point de vue développé dans la suite est que dans les pays riches la croissance des émissions dépend plus de la croissance de la population que de celle de la richesse. Empiriquement, les résultats de Gruebler[45] dans le secteur des transports confirment cette idée, qui peut se comprendre simplement puisque la croissance par habitant dans l'OCDE consiste surtout en des services immatériels. Dans cette optique, la Figure 2.20 représente les tendances sur 1990-1995 des émissions et de la population. Elle permet d'expliquer une large part de la différence de perspective entre les USA et l'Europe.

Outre Atlantique, le rythme d'accroissement des émissions de CO_2 est autour de 1% par an et a été supérieur sur la dernière décennie, alors que les émissions ont été quasiment stabilisées en Europe entre 1990 et 1996. Mais en termes d'émissions par tête, les deux régions sont autour de la stabilisation. Les différences d'évolution ne sont pas si grandes, surtout si on tient compte du caractère exceptionnel de la réunification allemande. Les différences tiennent aux perspectives démographiques.

Dans le scénario central du U.S. Bureau of the Census[46], la population américaine gagne 100 millions d'habitants entre 1996 et 2038[a]. Aux niveaux d'émission par tête actuels, les 32M de résidents américains supplémentaires prévus d'ici 2010 correspondent en terme de CO_2 à 271M de chinois, 770M d'indiens ou 75M d'européens. Même en supposant un taux de variation annuel des émissions per capita de -1% aux USA et +4% dans les pays en développement, ces chiffres restent considérables : la population additionnelle états-unienne représente 142M de chinois ou 406M d'indiens.

Cette différence Europe-USA pourrait aussi avoir des conséquences sur l'enjeu commercial : le leadership sur le marché des technologies moins polluantes, qui permet dans un second temps de les vendre au Sud[47]. Sur ce terrain en effet, une forte croissance démographique constitue un avantage, puisqu'elle implique des marchés domestiques important pour la construction d'équipements neufs, comme au Sud. Au contraire, une stagnation démographique implique des marchés plus mûrs, davantage orientés vers l'entretien et le renouvellement[48].

Comme nous l'avons écrit précédemment (page 58), la plupart des évaluations intégrées actuelles ne se concentrent pas sur la démographie, et les conséquences du différentiel de croissance démographique évoqué ici n'ont pas toutes été explorées. Il montre pourtant bien qu'il existe une responsabilité du Nord dans les émissions futures de gaz à effet de serre.De plus, comme le rappelle la proposition brésilienne à Kyoto[49], c'est le cumul des émissions qui contribue à changer la température.

Le principe de responsabilité commune mais différenciée, qui implique que les pays riches prennent l'initiative d'agir en premier contre l'effet de serre, est donc justifié en équité à la fois par la situation présente, l'histoire passée, et les perspectives futures.

[a] Cela s'explique notament par une immigration de 820 000 individus par an.

4.2. A moyen terme, le poids du développement

Une action des pays riches est d'autant plus nécessaire que les pays en développement font souverainement connaître qu'ils ne contribueront pas en premier à la limitation des émissions de gaz à effet de serre. Or, le GIEC[50] rappelle que retarder beaucoup leur entrée dans le processus impliquerait une trajectoire de concentration nettement au dessus du doublement du forçage radiatif, seuil habituellement utilisé dans les modèles d'évaluation des dommages.

Examinons par exemple la situation de la Chine, qui vient juste derrière les Etats Unis en terme d'émissions totales de CO_2 . Zhong Xiang Zhang[51] montre que comme l'efficacité énergétique y est relativement faible, et que le secteur énergétique est principalement basé sur le charbon. Il existe donc dans ce pays un grand potentiel pour accroître la production d'énergie tout en augmentant peu ou pas les émissions de CO_2 . Cependant, le coût des investissements nécessaires pour réaliser ce potentiel est considérable, et la Chine a fait savoir qu'une aide étrangère substantielle est requise pour assister à la transition. En l'absence de telles mesures, la croissance économique pourrait conduire à doubler la quantité de CO_2 émise par rapport à 1990 dès 2007, selon le modèle GREEN.

Nous avons aussi pu voir Figure 2.20 que dans certaines régions comme la République de Corée ou l'Amérique Latine, la croissance annuelle des émissions a dépassé 13% sur 90-96. A plus long terme, les résultats de modèles détaillés du GIEC synthétisés Tableau 2.2 montrent aussi une tendance à la multiplication du niveau d'émissions dans le Sud. De ces dynamiques inversées, beaucoup critiquent tout effort isolé du Nord. Le Tableau 2.3 montre par exemple que si les pays riches agissaient seuls ils devraient réduire de 50% par rapport à 1990 pour réduire les émissions mondiales de 20% par rapport à IS92a en 2020. Même si ces énoncés restent du domaine prospectif, avec de nombreuses incertitudes comme la crise actuelle en Asie nous le rappelle, on comprend que ce n'est pas là la façon économiquement la plus efficace de procéder.

	1990		2025		2100	
OECD	2,8	47%	3,5	33%	4,3	22%
USSR & Eastern Europe	1,7	28%	2,4	22%	2,5	13%
China & Centrally Planned Asia	0,6	10%	1,6	15%	4,2	21%
Other	0,9	15%	3,2	30%	8,8	44%
Total	*6*		*10,7*		*19,8*	

Tableau 2.2 : Emissions régionales de CO_2 pour le scénario IS92a

Emissions en GtC. Source: IPCC 92: Supplementary report, Table A3.7 page 81.

Diminution mondiale en 2020 par rapport à IS92a	**0%**	**5%**	**10%**	**15%**	**20%**	**25%**
Emissions OECD GtC	3,40	2,90	2,40	1,90	1,39	0,89
Nouvelle part OECD	34%	30%	27%	22%	17%	12%
Diminution OECD % IS92a 2020	0%	15%	29%	44%	59%	74%
Variation OECD % niveau 1990	+21%	+4%	-14%	-32%	-50%	-68%

Tableau 2.3 : Poids du tiers monde et diminution des émissions.

Exemple: Pour qu'en 2020 les émissions mondiales soient inférieures de 20% à IS92a, en supposant que les pays n'appartenant pas à l'OCDE se comportent comme dans ce scénario de référence (sans effort de réduction), alors il faut que l'OCDE réduise ses émissions de 50% par rapport à 1990.

Les considérations sur le poids du tiers monde dans les émissions futures, ont pu être interprétées

pour justifier un refus de tout objectif quantifié de limitation et de réduction des émissions[a] qui ne concerneraient que les pays développés. Nous citerons surtout la résolution dite Byrd-Hagel[52]du Sénat américain, qui diverge du discours plus engagé tenu par le Président Clinton. Le problème de la ratification des accords de limitation par le premier pays émetteur reste présent, mais sur le fond, nous avons vu au paragraphe précédent pourquoi cette interprétation nous semble excessive en équité et en droit.

Procédant d'une approche plus mesurée, Manne and Richels[53] ont montré empiriquement à l'aide du modèle MERGE 2 que la « where flexibility »[b] (traduit en français par le GIEC « souplesse spatiale ») permet de diminuer les coûts de l'ordre de 50%. Les implications pratiques de cette « where flexibility » ont soulevé au plan politique international de nombreux débats autour du concept d'exécution conjointe[c] et des permis d'émissions négociables.

On peut en effet se demander comme Yves Martin[54] s'il n'existe pas un risque que les pays riches privilégient les actions conjointes par rapport à la réduction de leurs propres émissions, ce qui pourrait présenter des inconvénients à terme. Notons à cet égard que les évaluations des coûts dans les pays en développement sont peu fiables, et que la souplesse spatiale n'exclut pas qu'il puisse exister aussi un volant d'opportunités d'action à coût faible dans les pays industrialisés. De plus, les évaluations intégrées actuelles n'incluent pas les effets de modèle que peuvent avoir les sociétés riches sur les sociétés en développement.

Toutefois, les actions conjointes participent au développement de la coopération et de la solidarité internationale nécessaires pour la prévention du changement du climat. Cette idée a reçu une reconnaissance officielle à la Conférence de Kyoto[55] avec l'institution d'un mécanisme de développement propre (clean development mechanism) multilatéral, pour permettre aux pays du Nord de recevoir des réductions provenant d'activités effectuées au Sud. Toutefois, beaucoup de modalités d'application restent encore à définir : évaluation et certification des effets à long terme, relation avec les mécanismes d'aide existants, ...

Il apparaît donc que la communauté internationale cherche encore des moyens de concilier efficacité et équité dans la lutte contre le changement global. A terme, il est important de se poser la question de la limitation des émissions dans les pays ne figurant pas à l'Annexe I.

4.3. A long terme, la convergence

L'entrée des pays hors annexe I dans un système de quotas contraignant ne peut se faire que dans un cadre qui respecte leur croissance. En conséquence, raisonner sur des limitations d'émissions pourrait rendre difficile un rapprochement des différents point de vue. L'intensité en carbone du PIB ou les émissions par personne pourraient constituer une base plus raisonnable pour la discussion sur la répartition des efforts. Ici, nous allons examiner le principe d'une convergence à long terme des émissions par habitant, dont le principe a été proposé par la France et étudié notamment par le GIEC[56].

Définir un objectif de convergence des émissions de CO_2 (ou d'équivalent CO_2) entre les différentes régions du monde, c'est se donner une cible constituée d'une date et d'un niveau par tête. On suppose que les émissions par tête varient linéairement entre leur niveau actuel (fortement différencié) et la cible. Cela permet en particulier de chiffrer les émissions par tête en 2010. A l'aide de projections démographiques relativement fiables à cet horizon, on est donc en mesure d'explorer quelles émis-

[a] Qui fixent des objectifs et des échéances. L'acronyme anglais est QELROS : Quantified Emissions Limitation and Reduction Objectives.

[b] Possibilité de choisir l'endroit où une stratégie d'atténuation ou d'adaptation sera appliquée afin de réduire les coûts associés aux changements climatiques.

[c] Concept selon lequel un pays développé devrait bénéficier d'une certaine sorte de crédit par le biais de la réduction des émissions qu'il contribue à financer dans un pays en développement.

sions sont permises dans les diverses régions du monde en 2010 selon la date et le quota commun par tête à plus long terme. Nous n'aborderons pas ici la question des échanges de quotas d'émissions.

Le Tableau 2.4 permet d'explorer les implications d'une convergence pour deux dates, 2050 et 2100, et trois niveaux possibles, 0.5tC, 1tC et 1.5tC par tête par an. Certes, ces niveaux ne sont pas compatibles avec la stabilisation des concentrations à long terme, ils exigeraient une renégociation (hypothèse toutefois réaliste). Mais il s'agit là d'examiner les conséquences d'une première étape. On constate alors qu'au niveau mondial, les niveau d'émissions en 2010 obtenus couvrent la plage pertinente comprise entre la référence IS92a et un profil médian de stabilisation WGI550.

Le premier résultat provient du fait que dans le schéma étudié, les pays en développement convergent en croissant vers l'objectif, et les pays développés convergent en décroissant. Cela explique que, comme on le voit Figure 2.22, lorsque la date de convergence se rapproche, le quota d'émission des premiers augmente, et celui de l'Annexe I diminue au point de passage en 2010.

Le second résultat concerne le rapprochement entre les USA et l'Europe de l'ouest. Les premiers partent aujourd'hui avec un niveau d'émissions par tête très élevé, mais leur quota d'émission est protégé par leur croissance démographique élevée. Dans un schéma de convergence rapide et forte (0.5tC en 2050), leur allocation se distingue peu de celle de l'Europe de l'ouest, -19% contre -18% par rapport à 1990, et ils ont même moins d'efforts à faire pour la cible à long terme 2100 : -3% contre -6%. Il apparaît que l'allocation des USA est sensible à la date de convergence, celle de l'Europe l'étant davantage au niveau choisi.

Troisièmement, en ce qui concerne les pays hors Annexe I, examinons sur la Figure 2.22 les conséquences d'une norme de convergence à 1tC aux deux horizons 2050 et 2100. Par rapport aux besoins prévus dans le scénario central l'IIASA/WEC, on voit que le critère favorise les pays peu émetteurs en 1990 : Asie du Sud et Afrique sub saharienne (omise sur la figure). Le Moyen Orient et l'Afrique du Nord sont neutres, mais les chiffres obtenus pour la Chine, +58% pour 20 ans et l'Amérique Latine, +64% pour 20 ans, ne sont pas à la hauteur de leur croissance économique attendue. En effet, nous avons vu Figure 2.20 que la croissance des émissions observée sur 90-96 a été supérieure +30% sur 6 ans pour la Chine, et +13% *par an* pour l'Amérique Latine.

On le voit, le système proposé ici ne résout pas tout, même s'il permet de mettre en lumière certains aspects régionaux importants pour les négociations futures. Il illustre aussi que même dans le cadre analytique restreint utilisé ici, il est possible de trouver des espaces de discussion qui tiennent en compte les intérêts futurs des différentes parties. Cela nous semble d'autant plus important que, comme nous avons tenté de le montrer tout au long de ce chapitre, le changement climatique pose un problème réel et sérieux.

	Population projection increase 1990-2010	1990 CO_2 emissions tC per capita	Implications for CO_2 emissions in 2010. Variation from 1990 levels.					
			Convergence 2100			Convergence 2050		
			0.5 tC	1 tC	1.5 tC	0.5 tC	1 tC	1.5 tC
Sub Saharan Africa	76%	0.3	106%	168%	230%	131%	244%	358%
Centrally Planned Asia & China	27%	0.6	24%	44%	64%	21%	58%	95%
Central & Eastern Europe	4%	2.2	-11%	-6%	-2%	-23%	-15%	-7%
Former Soviet Union	15%	3.4	-3%	0%	3%	-18%	-12%	-7%
Latin America & the Caribbean	38%	0.6	33%	52%	72%	28%	64%	100%
Middle East and North Africa	71%	0.9	57%	75%	92%	46%	77%	109%
USA and Canada	16%	5.1	-3%	-1%	1%	-19%	-15%	-11%
Japan, Australia, New Zealand	8%	2.5	-8%	-4%	0%	-21%	-14%	-7%
Other Pacific Asia	31%	0.5	34%	60%	86%	36%	84%	132%
South Asia	40%	0.2	89%	164%	239%	131%	268%	406%
Western Europe	9%	2.1	-6%	-1%	4%	-18%	-10%	-1%
World	**34%**	**1.1**	**10%**	**21%**	**33%**	**1%**	**22%**	**42%**

Tableau 2.4 : Implications d'une convergence des émissions per capita.

On peut remarquer que le scénario de référence IS92a (+42% d'émissions en 2010 par rapport à 1990) est cohérent avec une cible de 1.5tC en 2050, alors que le profil plus volontariste WGI550 (+8% seulement) correspond à 0.5tC vers 2100, et le profil médian MID550 (+18%) correspond bien à (1tC,2100) et (1tC,2050). Source: Données de population et d'émissions data de IIASA/WEC, scénario B.

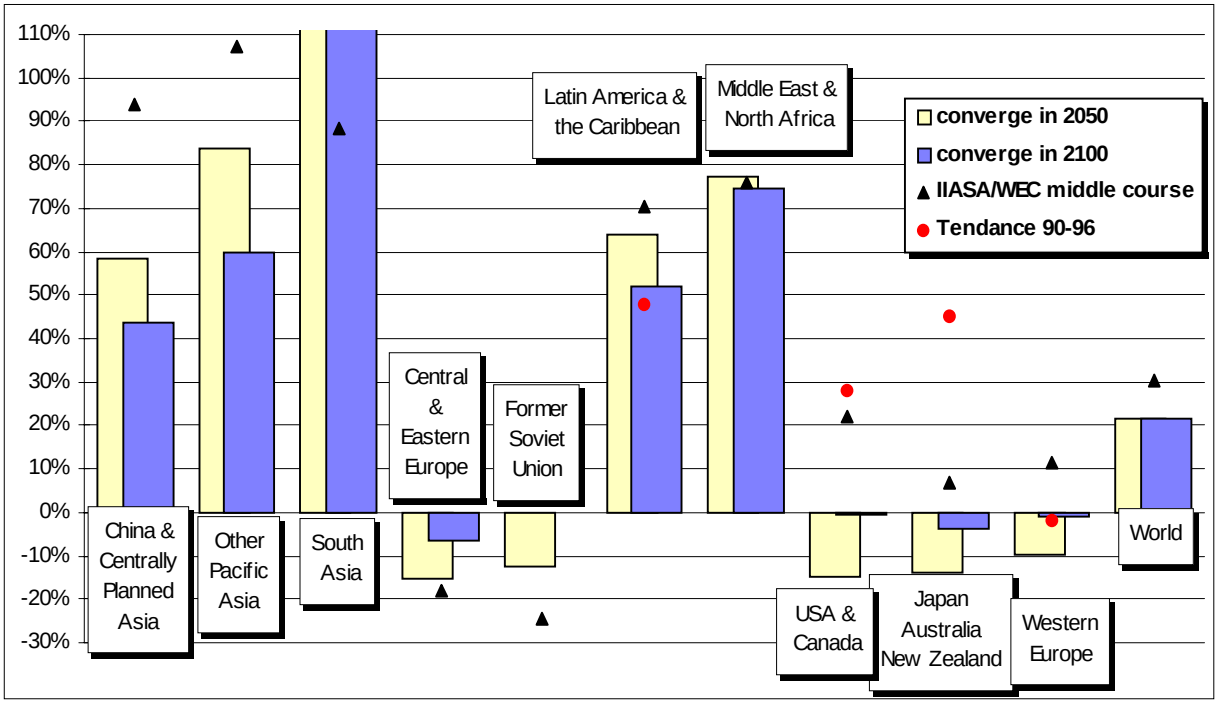


Figure 2.22 : Convergence des émissions par tête (1GtC en 2050 ou 2100)

Implications sur les émissions provenant de l'énergie. Les chiffres correspondent à la variation du niveau d'émissions entre 1990 et 2020. Par manque de données, la tendance 90-96 n'est représentée que pour quatre régions. On constate qu'au niveau global, les deux dates donnent des résultats identiques à court terme, mais les pays en développement ont intérêt à une date plus proche.

Références bibliographiques du Chapitre 2 (suite)

[1] Stephen H. Schneider, *Climate Change: Causes, Impacts And Uncertainties*, déposition auprès du Senate Committee on Environment and Public Works, Washington, DC, Hearings du 10 juillet 1997. En ligne à www.senate.gov, accès 12/97.

[2] Klaus Hasselmann, *Are we Seeing Global Warming ?*, Science 276 (5314), 914-915, 1997.

[3] Jean-Claude Duplessy, *Les Inattendus en Climatologie*, Pour La Science 237, 10-14, juillet 1996.

[4] James Lovelock, *Les Ages de Gaïa*, Robert Laffont, p. 190, 1990.

[5] GIEC, Groupe II, SPM, 1995. En ligne à www.ipcc.ch.

[6] William R. Cline, *The economics of Global Warming*, Institute for International Economics, Washington DC, 399 pages, juin 1992.

[7] GIEC, Document de synthèse, para. 2.7, 1995. En ligne à www.ipcc.ch.

[8] Jean-Claude Duplessy, *Quand l'Océan se Fâche, Histoire Naturelle du Climat*, collection Sciences, Editions Odile Jacob, 277 p., septembre 1996.

[9] Bruno Voituriez, *L'Océan et l'Évolution du Climat*, Revue du Palais de la Découverte, 21(210), 43-59, 1993.

[10] Robert Bindschadler et Patricia Vornberger, *Changes in the West Antarctic Ice Sheet Since 1963 from Declassified Satellite Photography*, Science, 279(5351), 689 - 692, 30 janvier 1998.

[11] Julia Uppenbrink, *Nota Bene: Seasonal Climate Prediction*, Science, 277(5334), 1952, 26 septembre 1997.

[12] T. F. Stocker et A. Schmittner, *Influence of CO_2 emission rates on the stability of the thermohaline circulation*, Nature 388, p. 862, 1997.

[13] Stephen M. Griffies et Kirk Bryan, *Predictability of North Atlantic Multidecadal ClimateVariability*, Science, 275(5297), 181-184, 10 janvier 1997.

[14] Patrick Michaels, *All Climate Disasters Point to Kyoto*, World Climate Report, 3(7), 15 decembre 1997. En ligne à http://www.nhes.com, accès 20/12/97.

[15] Richard S. Lindzen, *Statement Concerning Global Warming Presented to the Senate Committee on Environment and Public Works*, June 10, 1997, en ligne à http://www.senate.gov/~epw/lind0710.htm, accès 19/12/97.

[16] Gail McDonald, *18 June statement*, Global Climate Coalition, en ligne à http://www.worldcorp.com/dc-online/gcc/gailstatement.htm, accès 24/10/97.

[17] Jacques Grinvald, *De Carnot à Gaïa: Histoire de l'Effet de Serre*, La Recherche, 243, 532-538, mai 1992. Numéro Spécial sur l'Effet de Serre.

[18] Svante Arrhenius, *On the Influence of Carbonic Acid in the Air upon the Temperature of the Ground*, Philosophical Magazine 41, 237 (1896). En ligne comme partie de Carmen Giunta's Classic Chemistry Page, à Le Moyne College Department of Chemistry, http://web.lemoyne.edu/~giunta/index.html, accès 7/1/98.

[19] Morgan et Keith, 1995.

[20] Nordhaus, 1994.

[21] Greenpeace, en ligne à http://www.greenpeace.org/~climate/kimpacts.html, accédé 21/12/97.

[22] Yves Lenoir, *Contre l'unanimisme climatique*, Le Monde, p. 19, mecredi 17 décembre 1997.

[23] Pierre Naslin, *Faut il craindre l'effet de serre ?*, La Jaune et La Rouge 521, 16-21, janvier 1997.

[24] Yves Lenoir, *La Vérité sur l'Effet de Serre. Le Dossier d'une Manipulation Planétaire*, collection 'Science et Société', La Découverte, Paris, 173 pages, novembre 1992.

[25] GIEC, *Document de synthèse*, 7.3, 1996.

[26] Jean-Claude Duplessy, *Quand le Gulf Stream s'arrêtera...*, Le Nouvel Observateur, 88-89, numéro du 31 octobre au 6 novembre 1996.

[27] T. J. Crowley et K.-Y. Kim, *Comparison of longterm greenhouse projections with the geologic record*, Geophys. Res. Lett. 22, 933-936, 1995.

[28] Dale W. Jorgenson, *The Economics of Climate Change*, déposition auprès du Senate Committee on Environ-

Références bibliographiques du Chapitre 2 (suite)

ment and Public Works, Washington, DC, Hearings du 10 juillet 1997. En ligne à www.senate.gov, accès 12/97.

[29] Kaya, Impact of Carbon Dioxide Emission Control on GNP Growth: Interpretation of Proposed Scenarios, IPCC/Response Strategies Working Group, may1989. Cité dans IPCC Working Group III, Second Assessment Report, paragraphe 1.3.3.1.

[30] United Nations, *World Population Prospects, the 1994 revision*.

[31] Wolfgang Lutz, *The Future Population of the World, What can we assume today ?* Earthscan in association with IIASA, London, 500 pages, Revised and Updated Edition ,1992.

[32] Wolfgang Lutz, *op. cit.* , p. 22.

[33] Hervé Le Bras , *Les limites de la planète, Mythes de la nature et de la population*, Flammarion, mai 1994.

[34] Thomas Robert Malthus, *Essai sur le principe de population, livre V*, ed. Jean-Paul Maréchal, Flammarion, 1992. Traduit de l'anglais par Pierre et Guillaume Prévost en 1923 à partir de l'édition de 1817.

[35] Commission Mondiale sur l'Environnement et le Développement (CMED), *Notre Avenir à Tous*, p. 51, Editions du Fleuve, Montréal, 432 pages, 1988. Publié originellement en anglais par Oxford University Press sous le titre *Our Common Future*, 1987.

[36] William D. Nordhaus, *An optimal transition path for controlling greenhouse gases*, Science 258, 1315-1319, 1992.

[37] David W. Pearce et R. Kerry Turner, *The Sustainable Economy*, chapter 3 in *Economics of Natural Ressources and the Environment*, Harvester Wheatsheaf, 378 pages, 1990.

[38] Ger A. J. Klaasen et Johannes B. Opschoor, *Economics of Sustainability of the Sustainability of Economics: Different Paradigms*, Ecological Economics, 4, 93-115, 1991.

[39] Michael J. Grubb, *Politiques de l'Energie et Effet de Serre*, La Recherche, 243, 616-625, mai 1992.

[40] IPCC, SAR, ch. 7, par. 4.3

[41] Carlo Rubbia, *Protons, neutrons, plomb et mégawatts, propos recueillis par Gérard Chevalier*, La Recherche, 302, octobre 1997. En ligne à http://www.larecherche.fr/ARCH/N9710/oct97_ent.html, accès 6/1/98.

[42] Michael Jefferson, *Carbon Dioxide Emissions 1990-1996*, WEC Journal, 76-82, juillet 1997. En ligne à www.wec.co.uk/docindex.htm, accédé le 26/11/97.

[43] Heal, Chichilnysky, Starret, Hourcade

[44] Philippe Jaffré, interview dans *Le Monde* du 24 novembre 1997.

[45] Arnulf Grubler, *The Transportation Sector: Growing Demand and Emissions*, Pacific and Asian Journal of Energy, 3 (2), 179-199, dec 1993. Reprint published by IIASA as RR-94-5, may 1994.

[46] En ligne à http: //www.census.gov/ population/ www/ projections/ natproj.html, accès 12/97.

[47] Dominique Chouchan, *Les Industriels Verts à l'Assaut de la Planète Bleue*, La Recherche, 243, 632-638, mai 1992.

[48] Jean-Claude Chesnais, *Les Racines Economiques de la Déflation*, Le Débat, mars-avril 1997. Reproduit dans Problèmes Economiques, 2.544, 1-7, 26 novembre 1997.

[49] Brésil, *Proposed Elements Of A Protocol To The United Nations Framework Convention On Climate Change, Presented By Brazil In Response To The Berlin Mandate*, Secrétariat à la Convention Climat, note FCCC/AGBM/1997/MISC.1/Add.3, 1997. En ligne à http://www.unfccc.de/fccc/docs/1997/agbm/misc01a3.pdf, version .htm aussi disponible, accès 15/1/98.

[50] Tom M. L. Wigley, Atul K. Jain, Fortunat Joos, Buruhani S. Nyenzi et P. R. Shukla, *Implications of Proposed CO_2 Emissions Limitations*, IPCC Technical Paper 4, ISBN 92-9169-103-8, October 1997. En ligne à http://www.ipcc.ch/techreps.htm, accédé 6/1/98.

[51] Zhong Xiang Zhang, *Integrated Economy-Energy-Environment Policy Analysis: A Case Study for the People's Republic of China*, thèse de Doctorat, Landbouwuniversiteit, Wageningen, The Netherland, 1996. Rapport par A. D. Owen, The University of New South Wales, in Energy Policy, 25(2), 268-269, 1997.

Références bibliographiques du Chapitre 2 (suite)

[52] U.S. Senate Résolution 98, July 25, 1997. En ligne à http://www.senate.gov/~rpc/rva/1051/1051205.htm, accédé le 6/1/98.

[53] Alan Manne et Richard Richels, *The Berlin Mandate: The Costs of Meeting post-2000 Targets and Timetables*, Energy Policy, 24(3), 205-210, 1996.

[54] Yves Martin, *Note sur les « actions conjointes »*, Mission Interministérielle sur l'effet de serre, Ministère de l'Environnement, non publié, 29 juillet 1993.

[55] *Kyoto Protocol To The United Nations Framework Convention On Climate Change*, Article 12, 1997. En ligne à www.unfccc.de, accès le 7/1/98.

[56] Tom M. L. Wigley, Atul K. Jain, Fortunat Joos, Buruhani S. Nyenzi et P. R. Shukla, *op. cit.*

Chapitre 3. Du changement climatique au problème de décision

Si on a pu entendre que 'gouverner c'est prévoir', cette phrase devient de plus en plus fausse : le problème de l'action ne saurait se ramener à celui de la prédiction. Même quand on ne peut pas prévoir, il faut bien gouverner et prendre, rationnellement si possible, des décisions à propos du changement global ?

Pour cela, si une description transversale du problème, comme au chapitre précédent, est indispensable, il est aussi nécessaire de présenter les aspects historiques de la question, ce que nous allons faire maintenant. Ce troisième chapitre achèvera d'introduire les concepts-clé qui ont orienté notre thèse.

Nous examinerons en premier lieu la prise en compte institutionnelle du problème, marquée par la construction progressive d'une collaboration internationale et l'émergence d'un accord sur le principe de précaution. Si au départ, le problème de l'effet de serre intéressait surtout les climatologues, dès que le problème est apparu sur l'agenda politique les économistes ont participé aux débats. On a ainsi aboutit à la création d'évaluations dites 'intégrées', qui incluent à la fois les idées des climatologues, des économistes, et des autres disciplines concernées.

Puis nous exposerons les débats scientifiques auxquels ce principe a donné lieu, notamment autour des concepts d'action sans regret et de décision séquentielle. Mais la prise en compte des concepts économiques dans le débat est encore loin d'être achevée, et en particulier les apports récents de l'économie de l'environnement (valeurs d'options, valeurs hors marchés) .

En troisième partie, nous rappellerons la théorisation de la décision sous controverse élaborée au CIRED, en référence aux expériences passées de décision publique à propose de problèmes d'environnement posés dans des conditions comparables d'incertitude et d'irréversibilité.

1. La prise en charge institutionnelle du changement climatique

Dans ce paragraphe sur la gestion intergouvernementale de la question, nous allons tout d'abord préciser le rôle des diverses institutions officielles concernées. Puis nous nous concentrerons sur les deux principales organisations mises en place, la Convention Cadre sur le Changement Climatique[1] (FCCC en anglais) et le Groupe d'experts Intergouvernemental sur l'Évolution du Climat[2, 3] (GIEC, ou IPCC en anglais), avant de considérer une institution moins formelle : la communauté scientifique.

1.1. Les institutions impliquées

Comme on le voit sur la synthèse chronologique Tableau 3.1, les efforts pour formuler une réponse internationale efficace au problème du changement climatique sont organisés au sein du système des Nations Unies. L'Assemblée Générale, qui a un rôle de coordination et de direction dans le travail des Nations Unies, intervient relativement peu. Les deux institutions onusiennes[4] plus particulièrement concernées sont le Programme des Nations Unies pour l'Environnement (PNUD, ou UNEP en anglais), basée à Nairobi, et l'Organisation Météorologique Mondiale (OMM, ou WMO en anglais), à Genève.

Ces deux institutions sont complémentaires. L'UNEP a une expérience diplomatique. Il contribue notamment à la diffusion de l'information grâce à l'Unité d'Information sur le Changement Climatique basée à Genève. Quand au WMO qui coordonne les activités météorologiques à l'échelle mondiale, son expérience est d'abord scientifique.

1972	Conférence sur l'Environnement Humain à Stockholm. Création de l'UNEP.
1979	First World Climate Conference[5] , Genève, 12 - 23 février.
	Création du World Climate Programme.
1983	Création de la Commission Mondiale sur l'Environnement et le Développement.
	Le Rapport Bruntland 'Our common future'[6] paraît en 1987.
1985	Conférence sur les aspects scientifiques du changement climatique, Villach[7] (Autriche), 9 - 15 octobre.
1988	Création du GIEC[8] par l'UNEP et la WMO.
1990	Premier Rapport d'Evaluation du GIEC.
	Second World Climate Conference[9], Genève, 29 octobre - 7 novembre.
1992	Rapport intérim du GIEC.
	United Nations Conference on Environment and Development (UNCED), Rio de Janeiro, 3 - 14 juin.
	Convention Climat, Agenda 21 et Déclaration de Rio.
1994	Rapport Spécial et Technical Guidelines du GIEC.
1995	Première réunion de la Conférence des Parties (COP-1), Berlin, 28 mars - 7 mai.
1996	Second Rapport d'Evaluation du GIEC.
1997	COP-3 à Kyoto du 1 au 12 décembre.
	Protocole de Kyoto.
1998	COP-3 à Buenos Aires, 2-13 novembre

Tableau 3.1 : Evénements institutionnels récents sur le changement climatique

Sur le plan diplomatique, l'année clé est 1992, avec la signature à Rio de la Convention Cadre sur le Changement Climatique, dite aussi Convention Climat, préparée par l'International Negotiating Committee (INC/FCCC). Ce comité de négociation a aujourd'hui fait place à la Conférence des Parties (COP en anglais), dont le secrétariat est à Bonn. La COP[a] est le lieu où les pays se rencontrent pour préciser le cadre concret définit par la Convention Climat.

De nombreuses autres institutions facilitent le processus autour de la Convention Climat. Parmi les organismes gouvernementaux, nous pourrions par exemple citer l'Agence Internationale de l'Energie (International Energy Agency, IEA) ou le Conseil Mondial de l'Energie (World Energy Council, WEC). Les organisations non gouvernementales sont aussi actives et participent à la circulation de l'information.

Examinons maintenant plus en détail la convention, avant de retourner ensuite aux aspects scientifiques plus particulièrement pris en charge par le World Climate Programme à partir de 1979, puis à partir de 1988 par le GIEC, à la mission plus large.

[a] Elle même a formé quatre organisations 1/ l'organe subsidiaire de mise en oeuvre (Subsidiary Body for Implementation ou SBI) ; 2/ l'organe subsidiaire de conseil scientifique et technologique (Subsidiary Body for Scientific and Technological Advice, SBSTA) ; 3/ le groupe ad hoc sur l'article 13, (Ad Hoc Group on Article 13 AG13) et 4/ le groupe Ad hoc sur le mandat de Berlin (Ad hoc Group on the Berlin Mandate, AGBM).

ARTICLE 2 (OBJECTIVE) :

The ultimate objective of this Convention and any related legal instruments that the Conference of the Parties may adopt is to achieve, in accordance with the relevant provisions of the Convention, stabilisation of greenhouse gas concentrations in the atmosphere at a level that would prevent dangerous anthropogenic interference with the climate system. Such a level should be achieved within a time frame sufficient to allow ecosystems to adapt naturally to climate change, to ensure that food production is not threatened and to enable economic development to proceed in a sustainable manner.

ARTICLE 3 (PRINCIPLES) :

In their actions to achieve the objective of the Convention and to implement its provisions, the Parties shall be guided, inter alia, by the following:

1. The Parties should protect the climate system for the benefit of present and future generations of humankind, on the basis of equity and in accordance with their common but differentiated responsibilities and respective capabilities. Accordingly, the developed country Parties should take the lead in combating climate change and the adverse effects thereof.

2. The specific needs and special circumstances of developing country Parties, especially those that are particularly vulnerable to the adverse effects of climate change, and of those Parties, especially developing country Parties, that would have to bear a disproportionate or abnormal burden under the Convention, should be given full consideration.

3. The Parties should take precautionary measures to anticipate, prevent or minimise the causes of climate change and mitigate its adverse effects. Where there are threats of serious or irreversible damage, lack of full scientific certainty should not be used as a reason for postponing such measures, taking into account that policies and measures to deal with climate change should be cost-effective so as to ensure global benefits at the lowest possible cost. To achieve this, such policies and measures should take into account different socio-economic contexts, be comprehensive, cover all relevant sources, sinks and reservoirs of greenhouse gases and adaptation, and comprise all economic sectors. Efforts to address climate change may be carried out co-operatively by interested Parties.

4. The Parties have a right to, and should, promote sustainable development. Policies and measures to protect the climate system against human-induced change should be appropriate for the specific conditions of each Party and should be integrated with national development programmes, taking into account that economic development is essential for adopting measures to address climate change.

5. The Parties should cooperate to promote a supportive and open international economic system that would lead to sustainable economic growth and development in all Parties, particularly developing country Parties, thus enabling them better to address the problems of climate change. Measures taken to combat climate change, including unilateral ones, should not constitute a means of arbitrary or unjustifiable discrimination or a disguised restriction on international trade.

Encadré 3.1 : Extraits de la Convention Climat

La Convention a été adoptée le 9 mai 1992 après 15 mois de négociations. Ouverte pour signature au sommet de Rio de Janeiro le mois suivant, elle y a été signée par 154 États plus la communauté européenne (aujourd'hui Union Européenne). Au 19 juin 1993, lorsque le traité a été clos pour la signature, un total de 165 états (plus l'UE) l'avaient signé. La 50e ratification a été reçue le 21 décembre 1993, déclenchant la mise en vigueur de la convention 90 jours plus tard, le 21 mars 1994. Au 15 octobre 1997, 171 ratifications avaient été reçues[10].

1.2. La Convention Cadre sur le Changement du Climat

La Convention Climat est le premier instrument légal qui concerne directement le changement climatique. Son objectif ultime, exprimé article 2, est la « *stabilisation de le concentration des gaz à effet de serre dans l'atmosphère à un niveau qui préviendrait une interférence humaine dangereuse avec le système climatique.* » (voir Encadré 3.1). Pour atteindre cet objectif, la Convention pose une série d'engagements, dont la pertinence doit être périodiquement révisée par la COP à la lumière des objectifs du traité, des progrès de la science, et de l'efficacité des programmes nationaux sur le changement climatique.

Le changement climatique est un problème commun de l'humanité :

Ce concept fournit une base légale pour une action internationale de protection du climat. Il a d'abord été introduit dans une résolution prise à l'Assemblée Générale des Nations Unies en 1988, puis confirmé à maintes reprises dans de nombreuses conférences internationales sur le climat. En effet, le droit coutumier pose seulement qu'un État ne doit pas créer de dommages environnementaux à un autre (ou à une partie de l'environnement qui n'appartient à aucun autre, comme la mer). Le problème du changement climatique, totalement nouveau, n'entrait pas dans les principes légaux traditionnels gouvernant la pollution atmosphérique transfrontalière. Dire que c'est un problème commun de l'humanité, c'est reconnaître que tous les États ont un intérêt et un devoir à protéger le climat. Cela permet donc à un État d'un côté de la planète de se sentir affecté par le comportement d'un État situé à ses antipodes. Ce principe est affirmé dans la première ligne de la Convention.

Le principe de responsabilité commune mais différenciée :

On reconnaît largement que tous les États contribuent à créer le problème et que tous les États pourraient, à des degrés divers, être affectés. Mais les pays industrialisés ont développé leurs économies au cours de ces derniers 150 ans en partie en traitant l'atmosphère comme une ressource libre et inépuisable, et ils continuent à générer la plus grande partie des gaz à effet de serre. Les pays en développement tentent maintenant de s'industrialiser à une époque où l'atmosphère n'est plus considérée comme une ressource libre et inépuisable. En plus, leur contribution au changement climatique reste faible (bien que cette part soit appelée à croître dans les décennies à venir). Le principe de responsabilité commune mais différenciée pose donc que, bien que tous les États doivent agir pour protéger l'atmosphère, les pays développés doivent agir les premiers. Ce principe était déjà incorporé dans le protocole de Montréal, et il fonde la différence de traitement entre les engagements pris par les pays développés et les pays en développement dans la Convention.

Le principe de précaution :

Les activités potentiellement dangereuses devraient être restreintes ou interdites même avant qu'on ait prouvé qu'elles créent des dommages sérieux. Ce principe étant au centre de toute notre thèse, nous y reviendrons plus en détail dans le paragraphe suivant. Il est explicité au paragraphe 3 de l'article 3 de la convention. On remarque que l'existence même du traité montre une approche de précaution, puisque les États se sont mis d'accord pour agir malgré les incertitudes restantes sur le changement climatique.

Le droit au développement durable (sustainable development) :

Le texte de la Convention se réfère explicitement à ce droit, à plusieurs reprises. Le rapport Bruntland a défini le développement durable comme “un développement qui répond aux besoins du présent sans compromettre la capacité des générations futures à de répondre aux leurs”. Depuis, ce concept a été confirmé à de nombreuses reprises par les conférences internationales qui l'ont posé comme un droit. La déclaration de Rio, par exemple, le présente ainsi :

Article 1 : Les êtres humains sont au centre des préoccupations relatives au développement durable. Ils ont droit à une vie saine et productive en harmonie avec la nature. Article 3 : Le droit au développement doit être réalise de façon à satisfaire équitablement les besoins relatifs au développement et à l'environnement des générations présentes et futures

Encadré 3.2 : Les principes importants de la Convention Climat

En tant que traité cadre, la Convention pose surtout des principes et des engagements généraux, en laissant la question des obligations plus spécifiques à des instruments légaux futurs. Les trois principes fondamentaux (Encadré 3.2) sont *le principe de précaution* principe:, *le principe de responsabilité commune mais différenciée* (qui assigne aux pays développées de prendre la tête dans la lutte contre le changement climatique) et *le droit au développement durable*.

La Convention établit une différentiation explicite entre trois catégories d'États en établissant deux annexes. Les pays de l'OCDE[a] sont listés à l'Annexe II de la Convention. Cette liste complétée par les pays en transition vers une économie de marché, constitue l'Annexe I.

La Convention stipule que tous les pays développés (Annexe I) doivent prendre des mesures pour

[a] A la date de la signature, et sauf le Mexique.

limiter les émissions de dioxyde de carbone et d'autres gaz à effet de serre, avec le but de ramener ces émissions, individuellement ou collectivement, au niveau de 1990 à la fin de la décennie. Comme nous l'avons vu au chapitre précédent, beaucoup de pays de l'annexe II ne pourront réaliser cet objectif, mais la Convention ne prévoit aucune pénalité dans ce cas.

La Convention a toutefois obtenu plusieurs réalisations concrètes :

- Le problème est officiellement reconnu et les nations ont spécifié un objectif commun. Bien que ce point puisse sembler peu matériel, c'est bien le plus important, puisque tout le reste en découle. De plus, même si c'est une modification des comportements qui est nécessaire, celle ci ne peut se concevoir que accompagnée d'une modification culturelle, dans les préférences des agents économiques. La Convention marque le point de départ symbolique de ce changement dans les esprits et aide à le propager.
- Elle a établit des institutions pour supporter les efforts visant à réaliser les engagements et pour les vérifier : L'institution suprême est la Conférence des Parties, qui se réunit une fois par an.
- Un processus de Communications Nationales[11, 12] a été mis en place, qui joue un rôle central dans le fonctionnement de la Convention. Les pays rendent compte à la COP des mesures prises et de leurs émissions de gaz à effet de serre. Une méthodologie unifiée a été développée pour cela. Cela a permis d'obtenir un inventaire couvrant les pays de l'annexe I, actuellement en cours de réactualisation avec la seconde vague de communications nationales.

Plus récemment, la Conférence des Parties s'est réunie à Kyoto pour élaborer un protocole à la Convention. Des objectifs quantifiés de réduction et de limitation des émissions ont été définis, sans toutefois construire de mécanisme de sanction en cas de non respect. Seuls les pays de l'Annexe I sont concernés. La réduction demandée pour 2010 par rapport à 1990 est de l'ordre de 5% en équivalent CO_2 , ce qui correspond à peu à ce que ensemble, les pays de l'Annexe I ont réalisé[a] entre 1990 et 1995. L'objectif est donc de stabiliser l'Annexe I dans son ensemble au niveau de 1995. Le Protocole aura peu d'effet sur l'augmentation de la concentration des gaz à effet de serre dans l'atmosphère. Mail il peut être lu[13] comme comme une tentative pour inciter les pays riches à rechercher des moyens efficaces de réduire les émissions plus tard. En particulier, il introduit le principe des permis d'émission échangeables.

Pour résumer l'organisation diplomatique, la Convention Climat a mis en route la réponse internationale au changement climatique, mais la Conférence des Parties a beaucoup de travail dans les décennies venir pour assurer son succès. Examinons maintenant l'autre volet institutionnel : le GIEC.

1.3. Le Groupe d'experts Intergouvernemental sur l'Évolution du Climat

Le Groupe d'experts Intergouvernemental sur l'Évolution du Climat[14, 15] (GIEC, ou IPCC en anglais) est un organe intergouvernemental scientifique et technique original, qui joue un rôle vital pour fournir des évaluations de la recherche sur le changement climatique aux décideurs.

Le GIEC est constitué d'un très petit secrétariat sis à Genève et un réseau mondial de plusieurs milliers de scientifiques et d'experts faisant référence dans leur discipline, nommés par les gouvernements ainsi que par des organisations gouvernementales ou non. Il dispose d'un fonds pour couvrir les dépenses de fonctionnement et pour permettre aux pays en développement de tenir un rôle. Il s'exprime en publiant des rapports basés sur la littérature scientifique existante, à partir desquels il produit aussi des documents non techniques plus ciblés.

Son mandat est triple : évaluer l'état de la connaissance scientifique sur le changement climatique; examiner les impacts environnementaux, économiques et sociaux du changement climatique; et

[a] Sur 90-95, les pays en transition ont diminué leurs émissions de 30%, l'Union Européenne de 1%, ce qui a plus que compensé l'augmentation de 8% dans les autres pays de l'OCDE.

formuler des stratégies de réponse. Pour cela, le GIEC a formé trois groupes de travail. Le Working Group I s'est concentré sur la science, le Working Group II a étudié les impacts, et le Working Group III a analysé les options de réponses possibles. Le GIEC a aussi établi un comité spécial pour promouvoir la pleine participation des pays en développement dans ses travaux.

⇒ *L'objectivité des rapports d'évaluation du GIEC*[16]

Dans les médias et dans beaucoup de forums publics, les débats ne sont pas toujours basés sur une pratique scientifique saine. Les idées et opinions peuvent être librement exprimés, mais ne font pas toujours l'objet d'un examen rigoureux. Au contraire, le GIEC ne publie qu'à l'issue d'un processus d'évaluation particulièrement rigoureux. Les rapports sont examinés trois fois. Premièrement, la plupart des recherches évaluées dans les rapports ont été publiées dans des revues à comité de lecture. Deuxièmement, le projet de rapport est largement revu par un groupe d'experts nombreux et variés. Troisièmement, le rapport est revu par les gouvernements. Ce processus n'est pas facile, mais il assure que les rapports sont objectifs, transparents, et basés sur la meilleure information disponible dans le monde.

1) Pour chacun des environ cinquante chapitres du rapport, l'équipe de rédaction est constituée de plusieurs directeurs de rédaction et auteurs principaux, éventuellement coordonnés par un auteur unique. Cette équipe reçoit également la contribution d'autres scientifiques qui fournissent des informations techniques sur la base de la littérature publiée, sous forme de texte, graphique ou données. Chaque équipe compte au moins un expert d'un pays en développement, et reflète une diversité de points de vue. L'équipe rédige un premier projet principalement basé sur les travaux publiés dans les revues scientifiques et techniques prennant aussi en compte, avec les précautions nécessaires, les travaux plus récents et en identifiant clairement les points de vue scientifiquement valides mais divergents.

2) Des milliers d'experts revoient les premiers projets de chapitre. Les relecteurs incluent les scientifiques et techniciens spécialistes du domaine, et aussi les organisations non gouvernementales et internationales. Les relecteurs commentent l'objectivité et la complétude du projet de chapitre. Les références sont soigneusement vérifiées. Lorsque le temps le permet, un second projet est soumis à relecture. En se basant sur les projets de chapitre, les auteurs principaux et le bureau de chacun des groupes de travail rédige et un Résumé Technique (Executive Summary) et un Résumé Destiné aux Décideurs, non technique (Summary for Policy-makers).

3) Les gouvernements relisent les projets de chapitres approuvés par les experts et les résumés. Ils peuvent organiser leur propre expertise. Cette étape est importante car elle promeut et démontre une large acceptation internationale des conclusions techniques.

4) Les projets sont ensuite représentés devant le groupe de travail approprié pour *approbation* ou *acception* finale. L'approbation concerne les résumés, qui sont rediscutés ligne par ligne au cours d'une session spéciale du groupe de travail, et elle signifie qu'ils sont cohérents avec toute l'évaluation scientifique et technique. Les chapitres et le résumé technique, plus longs, ne peuvent pas être rediscutés ligne par ligne, ils sont seulement "acceptés". L'acception signifie que le groupe de travail juge que le texte est un compte rendu complet, objectif et équilibré de son sujet.

Le résultat est un rapport en quatre volumes de plusieurs centaines de pages. Chaque groupe de travail rédige un volume. Le quatrième reprend les résumés non techniques destinés aux décideurs, ainsi qu'un texte de synthèse. Le rapport de synthèse met en lumière les points principaux, y compris les plus controversés. Au niveau final, le GIEC tout entier accepte les résumés non techniques et discute ligne par ligne, avant de l'approuver, le rapport de synthèse.

⇒ *Le premier rapport en 1990*

Ce rapport d'évaluation et son supplément en 1992 ont largement été reconnus comme l'expression la plus légitime des opinions des scientifiques et des experts sur le changement climatique. Ils ont constitué une base importante pour la négociation de la Convention Climat.

- Le groupe de travail sur la science[17], unissant à peu près tous les chercheurs du monde ayant apporté une contribution significative dans ce champ, a conclu avec certitude que la concentration atmosphérique des gaz à effet de serre augmentait, et que si cette tendance continuait cela conduirait à un réchauffement de la surface de la terre. Ce groupe de travail a aussi formé certaines projections. Il a par exemple estimé que pour stabiliser la concentration atmosphérique de CO_2 , qui causerait plus de la moitié du forçage radiatif supplémentaire d'origine humaine, il faudrait réduire les émissions actuelles de 60 - 80% .
- Le groupe de travail sur les impacts[18] a conclu que le changement climatique pourrait avoir des effets hautement déstabilisant sur la société humaine. Le groupe a analysé les impacts qui pourraient se produire sur l'agriculture, la sylviculture, les écosystèmes naturels, les ressources en eau, l'habitat humain, les océans, les zones côtières... Il a conclu que ces impacts seraient selon toute vraisemblance très variables d'une région à l'autre, et que l'augmentation de la population, les avances techniques, et les changements dans les événements naturels comme El Niño pourraient influencer les impacts régionaux. Le groupe a souligné le besoin de recherches supplémentaires sur ces problèmes, et a remarqué que des études d'impact pourraient devenir plus précises lorsque des prédictions plus précises du changement climatique seront disponibles.
- Le groupe de travail sur les stratégies de réponse[19] a proposé des mesures spécifiques pour limiter le et s'adapter au changement global. Mettant l'accent sur le principe de responsabilité commune mais différenciée des pays développés et des pays en développement, le groupe a délimité des mesures à court et à long terme, la plus importante étant de limiter les émissions. Il a reconnu que ces mesures proposées ne pourraient réussir que grâce à la coopération internationale.
- Le comité spécial pour la participation des pays en développement a souligné le besoin d'assistance technique et financière du tiers-monde, qui ne disposent pas des ressources ni des informations nécessaires pour lutter contre les menaces du changement climatique. Cependant, les pays en développement pourraient être encore davantage affectés que les pays industrialisés. Pour ces raisons, le comité a considéré qu'il était important que les pays industrialisés offrent une assistance technique et financière aux pays en développement. Dans ce but, le GIEC a organisé une série de séminaires dans ces pays.

⇒ *Le rapport spécial en 1994*

En novembre 1992, le GIEC a établi un plan de travail pour continuer son effort et s'est restructuré. Alors que le Groupe I reste concentré sur la science, le Groupe II est responsable à la fois des impacts et des options de réponse. Le Groupe III se penche sur les aspects socio économiques théoriques et appliqués. Le développement des capacités propres dans les pays en développement devient une tache intégrale de chacun des trois groupes de travail.

Le GIEC a élargit ses activités en vue d'établir des méthodologies standardisées. Elles concernent les méthodes de mesure des sources et les puits de gaz à effet de serre dans chaque pays[20, 21] . Ses rapport guident aussi directement les études nationales sur les impacts et les réponses au changement climatique[22]. Il apparaît en effet indispensable de coordonner les mécanismes comptables utilisés dans les communications nationales, dans la perspective de mettre en place le processus de vérification nécessaire pour la crédibilité des engagements quantitatifs formulés à Kyoto.

Les nécessités politiques ont également conduit les experts à élaborer un système d'équivalence entre les différent gaz à effet de serre, basé sur le potentiel de réchauffement global (GWP, global warming potential en anglais) afin de préciser la notion d'équivalent CO_2 .

Enfin, comme le remarque D. Thery[23], le rapport spécial de 1994[24] a introduit l'idée qu'en première approximation, le niveau de concentration atteint dépend seulement du cumul des émissions passées. Cela est quantifié, compte tenu des plage d'incertitudes sur le fonctionnement du cycle du carbone, Tableau 3.2. La conséquence politique importante est que des trajectoires d'émissions différentes à court terme pouvaient aboutir à un même objectif de concentration à long terme. Physiquement, des émissions additionnelles aujourd'hui peuvent être compensées par des réductions supplémentaires

demain. Il existe donc une certaine souplesse temporelle (« where flexibility » en anglais) dans la réalisation de l'objectif de la Convention Climat.

⇒ *Le second rapport en 1996*

Si le rapport spécial a introduit la souplesse temporelle, il proposait surtout une réflexion sur un choix d'objectifs à long terme pour la concentration de CO_2 : 350 ppmv, 450 ppmv ... jusqu'à 1000 ppmv. Pour chaque objectif, un et un seul chemin d'émission était exposé aux décideurs. Cette situation a changé ensuite.

Le second rapport non seulement reprend l'éventail des objectifs à long terme, mais il propose deux chemins différents pour atteindre chacun de ceux-ci, comme on le voit Figure 3.1. On voit que les implications à court terme sont fort différentes. Les deux chemins ainsi définis délimitent une sorte de 'corridor'émissions:Safe C, pour reprendre le terme de J. Alcamo[25], à l'intérieur duquel différentes trajectoires permettent d'atteindre un même objectif.

Pour orienter l'action à court terme, le second rapport propose donc de se poser deux questions, qui seront celles que nous étudierons tout au long de cette thèse :

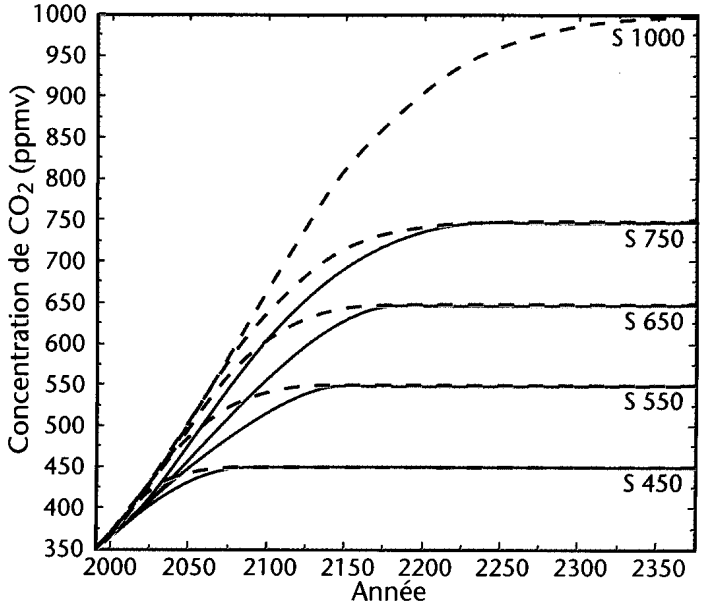
- Quel objectif *de concentration* choisir à long terme ?
- Laquelle des trajectoires *d'émission* l'atteignant est préférable ?

L'intérêt est alors que dans une large mesure, la seconde question peut se libérer de beaucoup des incertitudes sur les aspects physiques du problème, puisque justement il s'agit de choisir parmi des comportements aux effets indiscernables (au premier ordre) pour le climat.

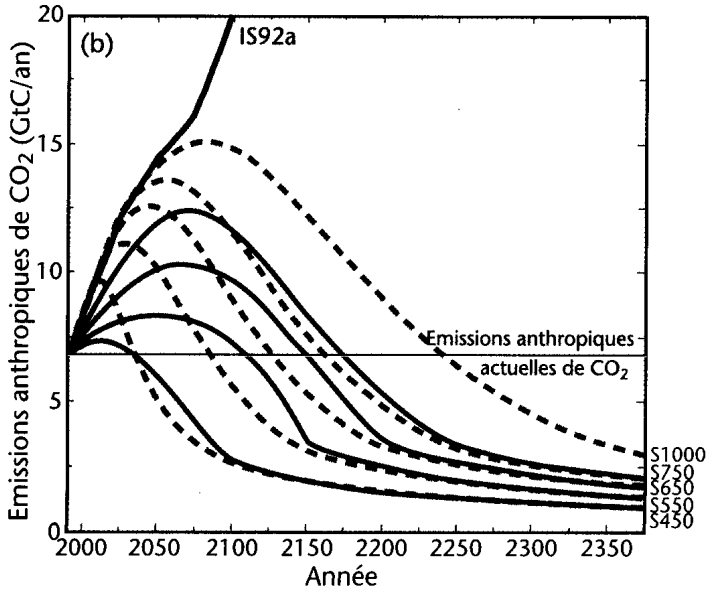
Niveau final de Stabilisation	Variation inter-modèles	Profils S[†]	Profils WRE[*]
350 ppmv	300-430 GtC		
450 ppmv	640-800 GtC	630	650
550 ppmv	880-1060 GtC	870	990
650 ppmv	1000-1240 GtC	1030	1190
750 ppmv[‡]	1220-1420 GtC	1200	1300

Tableau 3.2 : Emissions de CO_2 cumulées entre 1990 et 2100 (en GtC)

[†] *Profils appelés WGI à partir de 1995. En trait pleins sur les figures ci dessous.*
[*] *En traits pointillés sur les figures ci dessous.*
[‡] *Concentrations non stabilisées en 2100.*



Profils de la concentration de dioxyde de carbone devant permettre une stabilisation au niveau 450, 550, 650 ou 750 ppmv selon les trajets établis par le GIEC (1994) (traits pleins) et en supposant que le scénario IS92a sera vérifié au moins jusqu'en 2000 (tirets). Le dioxyde de carbone seul (c'est-à-dire sans tenir compte de l'incidence des autres gaz à effet de serre (GES) et des aérosols) entraînerait une élévation de la température d'équilibre par rapport à 1990 d'environ 1 °C (fourchette de 0,5 à 1,5 °C) en cas de stabilisation au niveau 450 ppmv, d'environ 2 °C (fourchette de 1,5 à 4 °C) pour 650 ppmv et d'environ 3,5 °C (fourchette de 2 à 7 °C) pour 1000 ppmv. En cas de doublement de la concentration de C02 par rapport à l'époque préindustrielle (où elle s'établissait à 280 ppmv), cette concentration atteindrait 560 ppmv. En cas de doublement par rapport à aujourd'hui (358 ppmv), elle atteindrait à peu près 720 ppmv.



Emissions de dioxyde de carbone permettant une stabilisation de la concentration au niveau 450, 550, 650, 750 ou 1000 ppmv selon les profils indiqués ci dessus, d'après un modèle moyen du cycle du carbone. Les résultats obtenus à partir d'autres modèles pourraient varier jusqu'à ± 15 % par rapport aux chiffres présentés ici. A titre de comparaison, on a également représenté les émissions de C02 selon le scénario IS92a et les émissions actuelles (traits pleins fins).

Figure 3.1 : Différents profils d'émissions et de concentrations à long terme.

Sources pour la page IPCC, Radiative Forcing of Climate Change, Table 2, p. 22, 1994 ; IPCC, Document de Synthèse, Tableau 1 et Figure 1, 1996

Cette évolution montre en substance qu'il est possible d'attendre et de réaliser quand même les objectifs à long terme. Il peut sembler que cela modère sur l'urgence d'une action pour limiter les émissions. Toutefois, la plus remarquée des nouveautés du second rapport[26] va dans le sens d'une alarme, puisque c'est la détection et l'attribution du changement climatique aux activités humaines, explicitée au chapitre précédent. De plus, les experts ont aussi attiré l'attention sur l'existence historique de variations climatiques rapides[27], qui renforcent la crédibilité du risque de surprises climatiques.

Sur le plan des impacts, des premiers éléments de la régionalisation des prédictions ont été introduits. Plusieurs conséquences vraisemblables ont été identifiées, dont certaines sont plus liées à la rapidité qu'au niveau du changement climatique : une intensification du cycle de l'eau avec une accentuation des extrêmes ; une mutation des grands types de concernant une proportion importante des zones

actuellement boisées ; et un risque de recrudescence des maladies infectieuses dues à l'extension des zones de reproduction des vecteurs.

⇒ *Actualité et avenir du GIEC*

Le GIEC ne s'est concentré sur les aspects économiques qu'à partir de 1992 pour un rapport achevé en 1995. Dans un premier temps, les outils économiques qui ont été appliqués au problème sont donc ceux qui étaient disponibles rapidement. En particulier, l'économie de l'énergie disposait de longue date de modèles numériques et conceptuels éprouvés. Par contraste, l'économie de l'environnement est peut être une branche relativement plus jeune. Il nous semble que mobiliser ses outils dans les évaluations du GIEC, et en particulier dans les modèles d'évaluation intégrée, pourrait être une tache importante. Cela pourrait apporter des éléments de réponse à plusieurs questions qui restent encore apparentes :

- On trouve encore peu d'analyses historiques reliant le problème actuel au déroulement des crises environnementales précédentes.
- Le problème des valeurs non marchandes reste pour une large part à explorer, avec en particulier la question encore délicate de la valorisation statistique de la vie humaine. Pour se limiter aux incidences liées à l'usage des ressources, ce qui est très loin d'épuiser le problème des préférences sociales pour la qualité de l'environnement, le GIEC souligne[28] :

  > *Les incidences non liées au marché telles que la dégradation de la santé humaine, le risque de mortalité et la détérioration des écosystèmes représentent une part importante des estimations disponibles sur le coût social de l'évolution du climat. L'estimation des dommages hors marché est cependant très incomplète et possède un caractère hautement spéculatif.*

- Ce second problème fait déboucher sur une troisième question, cruciale mais pour laquelle on peut ressentir un grand manque d'éléments quantitatifs appropriés : comment évaluer les bénéfices de l'action ?

En conclusion, le GIEC est un effort de coopération internationale qui fonctionne. Il est sans précédent pour ce qui concerne le Groupe III, l'économie. Il est encore très jeune par rapport au temps de la science et au temps du problème qu'il analyse, mais ses analyses ont déjà progressé notablement entre le premier et le second rapport d'évaluation. L'avenir du GIEC reflétera l'évolution des travaux de la communauté scientifique, que nous allons voir maintenant.

2. *Aspects socio-économiques: le sans regret et au delà.*

Après cet exposé des aspects institutionnels généraux, qui nous a conduit du système de l'ONU à la Convention Climat, puis au GIEC, nous allons à partir de ce point nous intéresser plus spécifiquement encore aux débats internes du Groupe de Travail III, sur les aspects économiques du changement global. Ce paragraphe est divisé en trois temps. Après avoir discuté la notion de coût de réduction, nous examinerons deux acquis de la recherche. Le premier est qu'il existe des possibilités d'actions à coût faible ou nul (le sans regret). Le deuxième, plus récent, est qu'il est justifié d'aller au delà du sans regret.

2.1. Les coûts de réduction

Le but ultime des travaux du groupe de travail III est l'aide à la décision publique. Une modalité de l'aide à la décision est l'analyse des coûts et des bénéfices (CBA en anglais). Le GIEC[29] prend ce terme dans un sens moderne, large : la CBA donne un cadre analytique qui cherche à évaluer les conséquences des diverses actions quantitativement plutôt que qualitativement. Cette définition inclus en particulier l'analyse coût-bénéfice traditionnelle[a], mais elle recouvre aussi d'autres méthodologies comme l'analyse coût-efficacité[b], l'analyse à critères multiples[c] ou l'analyse de la décision[d].

Quelle que soit la méthodologie choisie *in fine* , on ne peut se dispenser d'évaluer les coûts des diverses actions. L'évaluation des bénéfices est aussi importante, mais nous suivrons la tendance observée dans les débats passés et analyserons davantage les coûts de réduction des émissions. Notons que les phénomènes étant assez distincts (les impacts concernent davantage le secteur agricole, les réductions le secteur énergétique de l'économie), accorder moins d'attention aux bénéfices ne gène pas excessivement dans l'analyse des coûts.

⇒ *Les différents contextes du coût*

Afin de préciser les notions, il est important de noter que 'les coûts'[30, 31] peut désigner au moins quatre réalités différentes, énumérées ici de la plus stricte à la plus large :

- Les coûts technico-financiers de mesures concrètes spécifiques. Dans une optique d'ingénieur, on peut calculer le coût du remplacement d'une centrale au charbon par une centrale à gaz, ou le coût de plantation d'un programme de reforestation. Ils dépendent de données technico-économiques et sont usuellement présentés en valeur présente actualisée.
- Les coûts sectoriels. Il se calculent à l'aide d'un modèle sectoriel en comparant différents scénarios décrivant de façon cohérente l'équilibre partiel dans ce secteur.
- Les coûts macro-économiques. Ils sont calculés par rapport au Produit Intérieur Brut (PIB), en utilisant des modèles d'équilibre général. Ces coûts incluent les effets sur la consommation et l'investissement dans toute l'économie.
- Les coûts en bien-êtrebien-être. Bien qu'ils soient exprimés en unités monétaires, et parfois en fraction de PIB, les coûts en bien-être s'en distinguent théoriquement pour de nombreuses raisons, la première étant qu'il n'y a pas proportionnalité entre richesse et utilité. Le PIB ne prend pas en compte la façon dont les richesses sont réparties dans la société, ni l'épuisement ou la dégradation

---

[a] L'analyse coût-bénéfices traditionnelle implique de convertir toutes les conséquences dans une unité monétaire commune pour effectuer la comparaison

[b] Dans l'analyse coût-efficacité, on cherche à minimiser le coût d'une mesure prise pour atteindre un objectif défini au moyen d'autres critères.

[c] L'analyse multicritère est conçue pour le cas où certains bénéfices et/ou certains coûts se mesurent en terme non financiers.

[d] L'analyse de la décision vise spécifiquement la prise de décision en cas d'incertitude.

des ressources naturelles. Enfin, examiner seulement le PIB ne permet pas d'évaluer l'effet de mesures qui, par exemple, diminueraient la consommation au profit de l'investissement tout en conservant la production constante (augmentation du taux d'épargne liée à une diminution de la productivité du capital).

La disparité des notions de coûts pose problème. En effet, si les coûts financiers sont directement mesurables, les coûts en bien-être sont les plus importants pour le choix social, et il sont difficiles à calculer à partir des coûts en PIB. Là où des distorsions du marché sont importantes, les prix observés ne reflètent pas la rareté sociale relative des ressources, ce qui pose des problèmes empiriques. Théoriquement, on devrait également tenir compte des composantes informelles et non marchandes de l'utilité, ainsi que de son évolution dans le temps.

⇒ ***Théorie du bien-être***

Dans l'état actuel de la science économique, on peut dire que les coûts en bien-être restent mal mesurés, mais on dispose néanmoins d'éléments théoriques comme ceux rappelés Figure 3.2. Ces éléments ont permis de fonder les premières analyses, comme la fonction de coût de DICE[32] . En approfondissant, plusieurs questions se posent toutefois :

- La théorie s'applique pour des petites variations de la demande, alors que la modération du changement climatique appelle des changements importants des marchés de l'énergie.
- C'est une démonstration en équilibre partiel. Or les effets d'équilibre général semblent a priori non négligeables : si on envisage une taxe, le recyclage de son produit dans le reste de l'économie peut ajouter ou retrancher au coûts sociaux directs.
- Elle suppose que le marché est initialement en situation d'équilibre, ce qui est loin d'être le cas en pratique. Si on prend en compte l'existence de taxes ou de subventions préexistantes, alors

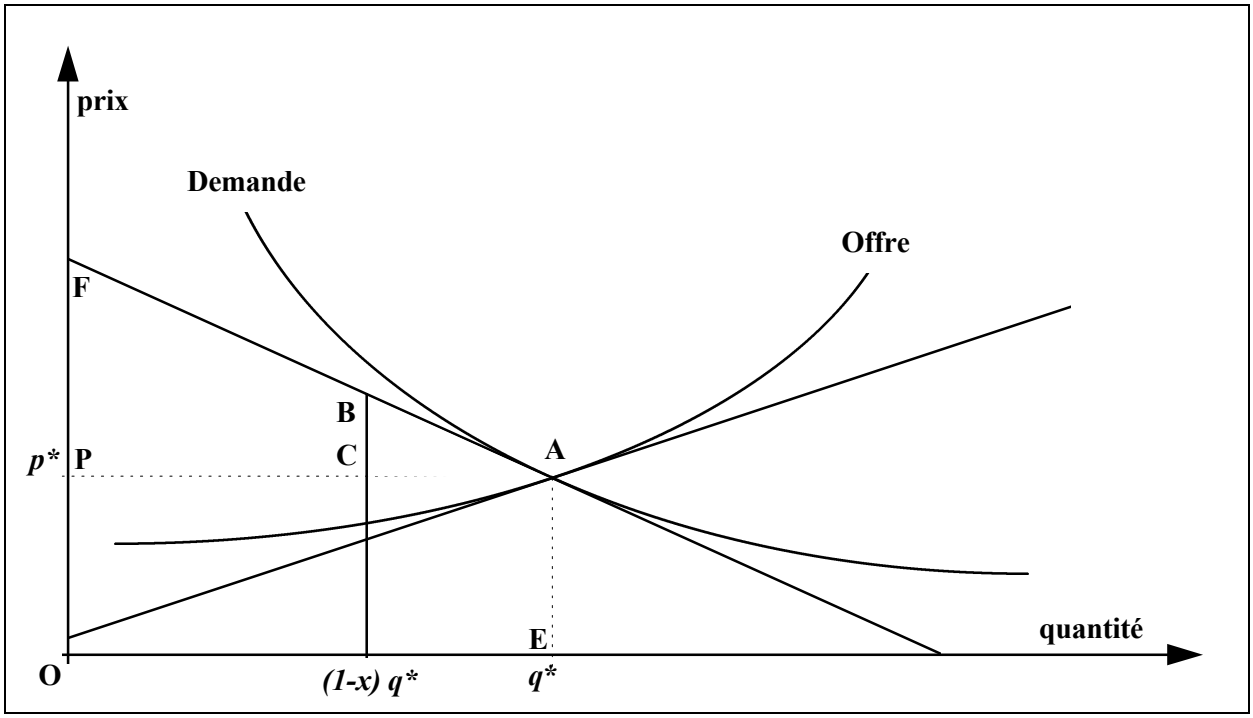


Figure 3.2 : Perte de surplus engendré par la réduction.

Cette figure montre que le coût augmente quadratiquement avec x*, la réduction des émissions. La quantité d'énergie est en abscisse, le prix est en ordonnée, et le coût est identifié à la perte de surplus du consommateur. Au premier ordre c'est l'aire du triangle ABC. Ce triangle est l'image de APF par l'homothétie de centre A et de rapport* x*, donc* A*(ABC) =* x A*(APF). Source GIEC (1995, WG III, ch. 8, box 1).*

diminuer la quantité peut améliorer ou bien détériorer davantage la situation.

Cette première approche ne fournit finalement qu'un éclairage très partiel et statique du problème du coût de réduction des émissions, appelée à être dépassée par les travaux ultérieurs.

⇒ ***Coûts d'ajustement***

Nous disposons déjà d'un premier élément dynamique avec la notion de coûts d'ajustement. Celle ci, introduite au premier chapitre de cette thèse dans un cadre microéconomique, reste pertinente au niveau agrégé pour le problème de la réforme des conditions de production et de consommation d'énergie qui nous intéresse. Pour utiliser une image physique, le système socio-économique fait preuve d'une grande inertie, dans le sens où réaliser une déviation par rapport au scénario de référence demande des efforts qui dépendent de la vitesse à laquelle on s'écarte de cette référence. La Figure 3.3 représente une situation dans laquelle ces coûts constitueraient une part majoritaire des coûts de réduction pendant les prochaines décennies.

2.2. Les actions sans regret.

La distinction entre les diverses définitions possibles des *coûts* que nous venons de rappeler permet de comprendre une partie du débat scientifique soutenu ayant eu lieu autour de la question de l'existence et de l'importance pratique des actions « sans regrets »[a 33] : pourquoi certaines mesures, qui apparaissent rentables en elles-mêmes et apportent en plus un bénéfice pour l'environnement global,

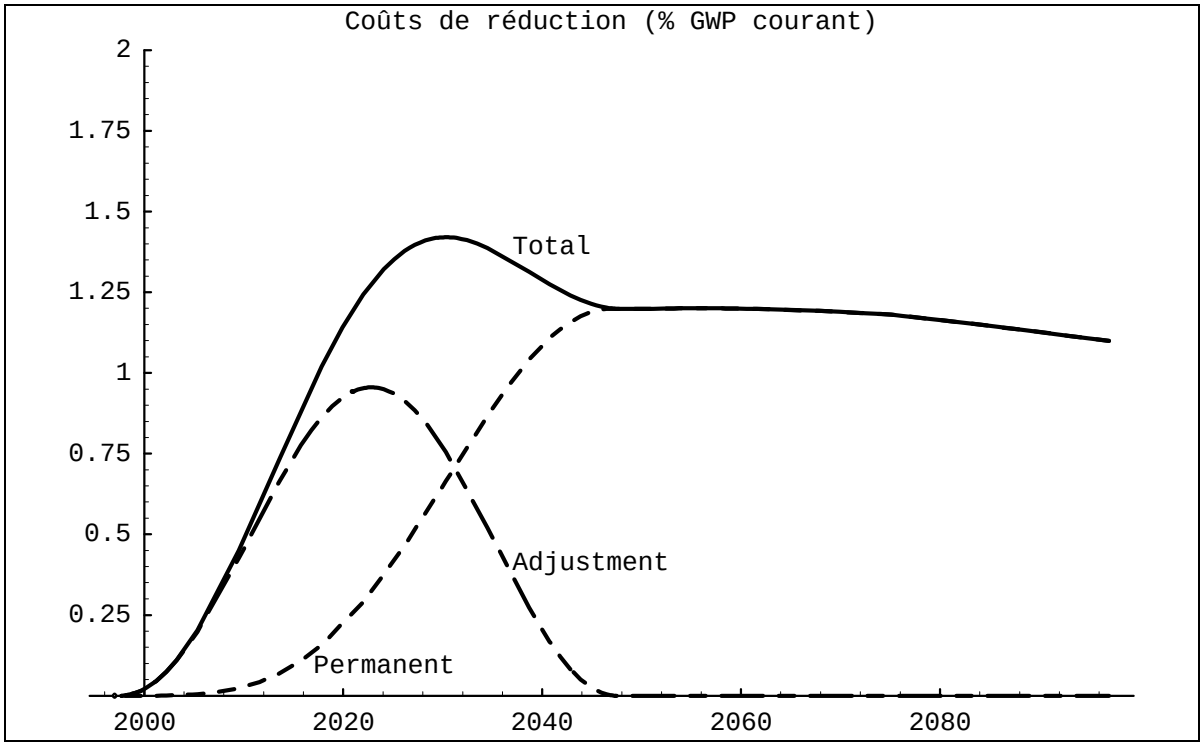


Figure 3.3 : Coûts de réduction

Une répartition possible des coûts permanents et des coûts d'ajustement, pour la réduction des émissions de CO_2 , sans actualisation. On considère ici un programme de réduction des émissions qui suit une courbe en S, visant une réduction de 50% au bout de 50 ans. La courbe représentant les coûts d'ajustement est un pic, qui atteint son maximum au milieu du programme de réduction, après 25 ans. C'est à cette période que l'on gagne chaque année le plus de points de réduction. Par contre, le coût permanent augmente en S, en suivant le niveau de réductions, pour les 50 années du programme. Il de coûte, mais ne procure aucun bénéfice. On appelle actions sans regrets, ou mesures du programme qui sont au progrès égaux à leur coût pour la société, ou bien que soient les avantages apportés par l'atténuation des incidences c'est-à-dire du réchauffement climat.

n'ont pas été mises en place ?

Dans cette section, nous allons exposer synthétiquement l'autre partie du débat, en définissant plus précisément ce qu'on entend par « *bénéfices* sociaux justifiant des actions sans regret ». Ceux ci peuvent être de trois ordres : potentiel de coût négatif, double dividende économique, double dividende environnemental.

⇒ *Le double dividende environnemental*

Le double dividende environnemental désigne la synergie entre les stratégies de réduction des émissions de gaz à effet de serre et les réductions des autres nuisances environnementales comme la pollution locale de l'air, les encombrements routiers, la dégradation des sols[a]. Son existence pouvant difficilement être remise en question, nous nous proposons ici de montrer son importance pratique. Pour cela, nous exposerons un cas concret, l'acidification en Asie.

L'IIASA[34], en partenariat avec le CIRED, illustre le bénéfice de réduire les émissions sur le problème de l'acidification en Asie. Il utilise le modèle RAINS, qui couple un module énergie-émissions, un module transport-retombées de pluies acides et un module d'impact sur les écosystèmes. Le module d'impact calcule la charge critique en soufre pour chaque région, c'est à dire le niveau de retombées qui ne cause pas à long terme de dommages aux écosystèmes locaux. Les modules d'émissions-transport permettent de leur côté d'estimer quelles seraient les retombées dans tel ou tel scénario. Le rapprochement de ces deux résultats permet de tracer la carte des lieux où la charge critique est dépassée. RAINS permet donc de simuler l'impact sur les écosystèmes d'un scénario économique et énergétique donné. Cette simulation permet de comparer trois scénarios :

- Soit F un scénario de référence dans lequel les émissions croissent sans contrainte environnementale. La Figure 3.4 représente, pour l'Asie de 2050, les régions de dépassement de la charge critique dans le scénario F. On voit que ces régions sont largement étendues, il apparaît donc que ce scénario est inacceptable.
- L'IIASA définit alors un scénario FS en imposant une contrainte sur les retombées acides, sans poser de contrainte sur les émissions de CO_2 . Dans ce scénario, les émissions de soufre sont notablement réduites par rapport à F, mais pas les émissions de CO_2 . Cela n'est pas une surprise. La plupart des émissions de S peuvent être captées, par exemple grâce à des filtres de désulfuration sur les cheminées. En conséquence, on peut dire qu'il n'y a pas un grand double dividende environnemental à réduire les émissions de soufre.

[a] On peut dire aussi qu'il s'agit des *autres externalités environmentales positives* des actions visant à modérer le changement climatique.

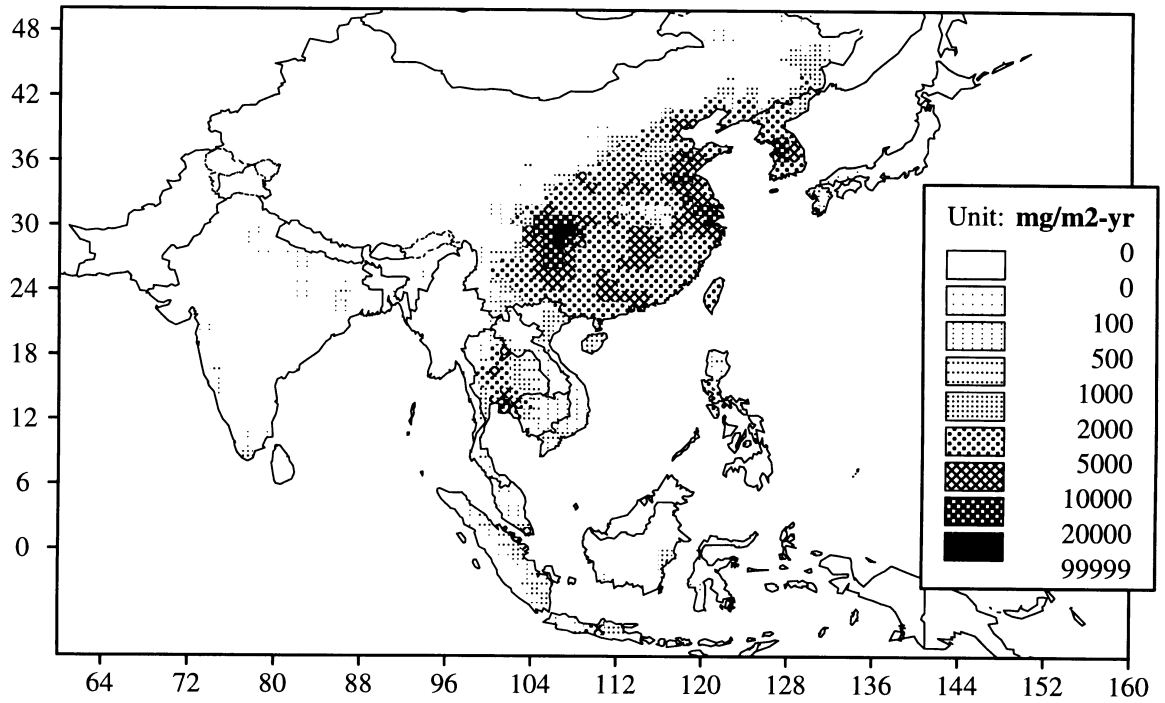


Figure 3.4 : Retombée soufrées dépassant la charge critique en Asie, 2050.

Source IIASA (1997), scénario F. Le niveau de pluies acides dépasse ce que l'on a pu connaître de pire en Europe Centrale et de l'Est. Dans ce scénario, on peut par exemple estimer que les récoltes en Chine sont diminuées d'au moins 10% à cause des dommages directs dus à l'acidification. Dans ce pays, des écosystèmes seraient dévastés sur plus de 200 000 km□ , suite à des excès supérieurs à 20gS/m□.

- Examinons maintenant la réciproque : soit FC un scénario défini en imposant une contrainte sur la concentration de CO_2 , sans poser de contrainte sur les émissions de S. Dans FC, les émissions de CO_2 sont notablement réduites par rapport à F. Mais de plus, les émissions de soufre sont aussi notablement réduites, pratiquement au même niveau que dans FS. Ce résultat est aussi intuitif, puisque la réduction des émissions de CO_2 s'obtient en consommant moins d'énergies fossiles, et surtout de charbon riche en soufre. Il apparaît donc que parvenir à limiter les émissions de CO_2 limite, en prime, les émissions de S. Dans ce cas, il existe un double dividende environnemental significatif.

Ces résultats sont repris Tableau 3.3. L'IIASA les a complétés en examinant les coûts supplémentaires de FC et FS par rapport à F. Les disparités géographiques et temporelles, non explicitées ici, sont significatives. Mais globalement, il apparaît que le coût de FS est 40 quand le coût de FC est 100. Cela signifie que dans le cas étudier, on pourrait imputer de l'ordre de 40% du coût de la réduction des émissions de CO_2 à la lutte contre l'acidification régionale. Le double dividende environnemental peut à lui seul justifier la notion d'actions sans regrets.

Scénario	F	FS	FC
Emissions de Carbone (GtC)	13,5	12,5	9,5
Emissions de Sulfures (MtS)	130	70	70

Tableau 3.3 : Emissions mondiales de C et de S en 2050.

Source : projet INASUD, IIASA/CIRED (1997) p. 24

⇒ *Deux approches différentes*

L'existence des deux autres justifications possibles du sans regret, le potentiel de coût négatif et le double dividende économique, est moins évidente.

Le double dividende économique correspond aux avantages économiques indirects découlant des politiques visant à limiter les émissions. Le produit d'une taxe sur le carbone pourrait par exemple servir à diminuer la fiscalité sur le travail, et améliorer ainsi l'emploi et la croissance. Accélérer les programmes de recherche et développement pourrait avoir des retombées positives dues par exemples aux externalités de réseau ou autres.

La notion de réalisation d'un potentiel de coût négatif vise à souligner l'existence de technologies à la fois moins polluantes et plus économiques que les technologies actuellement employées.

La question de l'existence d'un potentiel de coût négatif et d'un double dividende économique, s'inscrit dans une tradition d'étude des systèmes énergétiques qui remonte à plusieurs décennies[37, 38]. Posée dans le cadre du problème du changement climatique, elle peut se traduire par "Est ce si cher que ça de réduire les émissions ?" La Figure 3.5 illustre deux vues différentes sur le coût de réduction des émissions. Ces deux vues illustrent les résultats de deux approches de la modélisation des systèmes énergétiques.

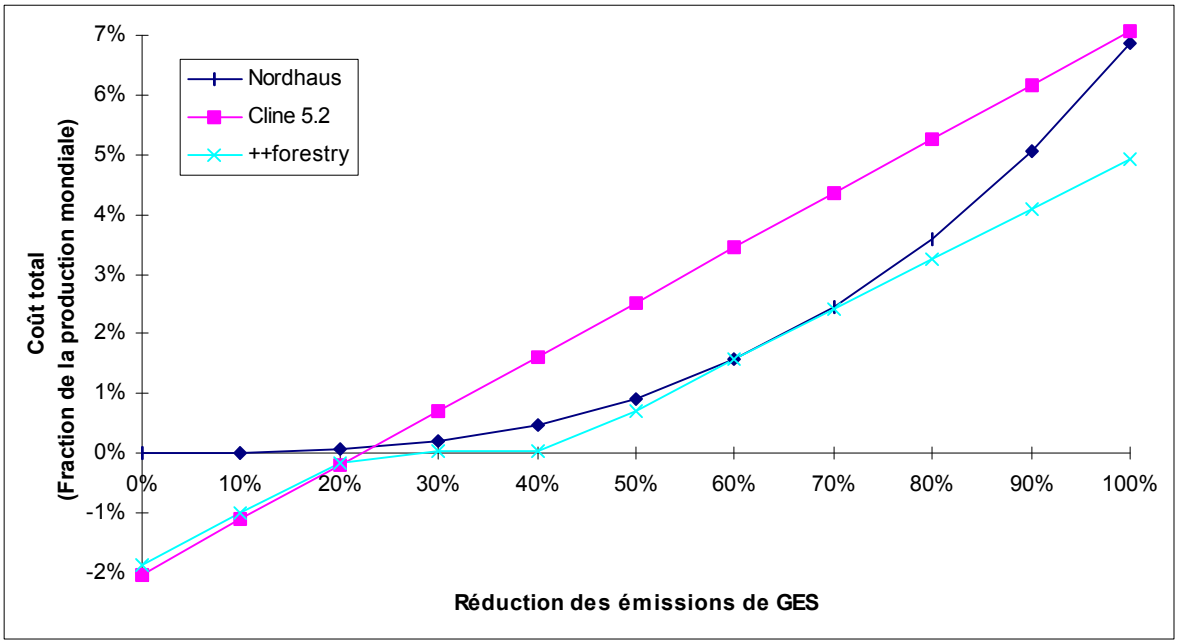


Figure 3.5 : Différentes vues sur le coût de réduction des émissions.

La figure montre l'existence d'un potentiel de réduction à coût négatif ou nul de l'ordre de 20-30%. D'après Nordhaus[35] et Cline[36].

Les deux premières courbes sont ajustées d'après les résultats de divers modèles. Elles ont pour équation, pour un taux de réduction x *compris entre 0 et 1 :*

Nordhaus $y = e^{-2,679}\, x^{2,89}$

Cline 5.2: $y = -1.16\% + 9.1\%\, x - 0.0246\% \,(year - 1990)$

++forestry *Cette courbe, prend en compte deux éléments de plus que les précédentes. Premièrement, elle se base à la fois sur les résultats des modèles ascendants et descendants. Comme ces derniers aboutissent généralement à des coûts de réduction inférieurs, cela tend à descendre la courbe par rapport à la précédente. Deuxièmement, elle inclut la possibilité de capturer du carbone par la reforestation. Le coût d'un programme de reforestation est positif mais faible, il correspond à la hauteur de la partie plate de la courbe entre 25 et 40%.*

- L'approche descendante (top-down en anglais), analyse les comportements agrégés en se basant sur des indices de prix et d'élasticités. La courbe d'après Nordhaus[39] est une exponentielle ajustée d'après les résultats de diverses modèles de ce type, illustrés par exemple dans le GIEC[40]. Par construction, il n'y a pas de coûts négatifs.
- L'approche ascendante (bottom-up en anglais), dépend d'analyses détaillées des potentiels techniques, se centrant plus sur l'intégration des coûts et des performances des techniques concrètes. De telles approches montrent souvent un fort potentiel de coûts négatifs. Les deux autres courbes de la Figure 3.5 montrent une possibilité de réduire les émissions d'environ 20% à coût négatif. La première, notée "Cline 5.2" est aussi ajustée d'après des modèles descendants mais il s'agit d'une droite.

Les approches ascendantes sont mieux adaptées pour discuter les coûts technico-financiers, alors que les approches descendantes privilégient les coûts en PIB. Signalons aussi un problème réel de communication scientifique entre deux cultures, ingénieurs et économistes.

Mais au fond, on voit que ce sont les mêmes données qui supportent deux interprétations différentes. En effet, c'est le choix du type de courbe ajusté, exponentielle ou droite, qui permet de poser ou d'exclure a priori la possibilité de coûts négatifs. Il apparaît que contrairement à ce qu'on aurait pu penser en premier abord, la différence ne provient pas tant de l'approche choisie (ascendante ou descendante), mais de visions divergentes sur la nature de l'économie.

⇒ *Des vues différentes sur l'économie*

Pour qu'un potentiel de coûts négatifs existe, il faut que l'économie ne soit pas sur la frontière de production efficace. En d'autre termes, si il existe des distorsions des marchés qui contribuent à augmenter les émissions, alors il peut être possible, en réduisant ces inefficacités, d'améliorer l'activité économique tout en réduisant la pollution[41].

Concernant l'état actuel de l'économie, même si tous les modèles ne le représentent pas explicitement, il semble que l'on puisse constater l'existence d'inefficacités significatives dans la production et la consommation d'énergie dans de nombreuses régions du monde. Par exemple, les pertes en ligne dans la transmission et la distribution d'électricité sont de l'ordre de 22% en Inde, contre moins de 10% dans les pays développés[42]. Toutefois, cet exemple illustre aussi la distance entre l'identification de l'existence d'un potentiel et sa mise en oeuvre pratique. Il permet de souligner une première fois l'importance de prendre en compte les coûts d'ajustement dans l'évaluation.

Concernant la vision de l'état futur de l'économie, les analyses sont instrumentées par la construction d'un scénario de référence, par rapport auquel les coûts de réduction sont calculés. Or, on comprend que si l'on se donne une situation de référence à 2050 très peu efficace énergétiquement, alors il est naturel de trouver des coûts marginaux de réduction plus faibles que si l'on suppose que la référence est déjà très efficace. Le problème est qu'à long terme, les deux hypothèses sont défendables. Les différences sur l'existence d'un potentiel sans regret illustrées Figure 3.5 reflètent donc des visions différentes quand à la persistance, dans l'évolution du monde non perturbée par les politiques climatiques, de déficiences du marché (market failures en anglais) et/ou de déficiences institutionnelles (institutional failure en anglais) génératrices d'inefficacité.

Les différents résultats sur l'existence d'un potentiel sans regret sont donc difficilement comparables entre eux puisqu'ils relèvent d'hypothèses différentes sur l'évolution à long terme de l'économie. Malgré ces divergences, il est toutefois frappant de constater une certaine cohérence sur un message politique essentiel[43] :

> *La littérature indique que la plupart des pays ont la possibilité de prendre des mesures "sans regrets". Le risque global net de dommages imputables à l'évolution du climat, la prise en compte de l'aversion pour le risque et le principe de précaution justifient l'adoption de mesures plus ambitieuses que les mesures "sans regrets".*

Le GIEC[44] s'accorde à dire que des améliorations sensibles de l'efficacité énergétique, de l'ordre de 10%-30%, peuvent être réalisées en deux à trois décennies à des coûts négatifs ou négligeables, avec un potentiel nettement plus élevé à long terme. Cette citation montre clairement que les analyses économiques convergent pour signifier aux décideurs l'existence d'une marge de manoeuvre significative, même sans compter le double dividende environnemental dont l'existence et l'importance ne fait pas de doute.

2.3. Le principe de précaution

⇒ ***Le principe***

Le principe de précaution principe: (Godard et alii[45]) est ainsi formulé par la Déclaration de Rio[46] :

> *En cas de risque de dommages graves ou irréversibles, l'absence de certitude scientifique absolue ne doit pas servir de prétexte pour remettre a plus tard l'adoption de mesures effectives visant à prévenir la dégradation de l'environnement.*

Pour le changement climatique, le risque de dommages graves ou irréversibles est clair, ainsi que l'absence de certitude scientifique absolue. Le principe justifie donc non seulement d'exploiter la marge de manoeuvre identifiée ci dessus, mais d'aller au delà. Le principe fonde des actions limitant la souveraineté[a] des États, qui sont à défaut libres de leurs activités à moins que et jusqu'à ce que un lien causal entre une activité et un dommage particulier soit établi.

Les actions de politique climatique se classent usuellement en deux catégories, l'adaptation et l'atténuation. Le principe de précaution visant à prévenir la dégradation de l'environnement, il pourrait donc sembler concerner davantage l'atténuation que l'adaptation. Toutefois, et même si les négociations internationales actuelles portent également davantage sur l'atténuation, l'importance d'une politique pro-active d'adaptation au changement climatique ne saurait en être diminuée. Compte tenu des émissions passées et des inerties, un certain changement climatique est inévitable au cours du prochain siècle.

⇒ ***Décision séquentielle***

Appliquer le principe de précaution, c'est prendre des mesures à temps, donc avant de disposer de toute l'information, quitte à réviser les choix ensuite. Bien qu'elle ne soit pas au centre de tous les modèles, la notion de décision séquentielle, synthétisée ci dessous par le GIEC[47], est au centre de toutes les analyses sur les politiques climatiques[48] :

> *Le problème n'est pas de définir aujourd'hui la meilleure politique pour les 100 ans à venir, mais de choisir une stratégie avisée et de l'adapter ultérieurement à la lumière des progrès des connaissances.*

Pour rapprocher cette problématique de celle du développement durable on pourrait écrire que : Les mesures prises aujourd'hui doivent avoir un coût raisonnable pour la génération présente et laisser une situation suffisamment flexible pour la suite. La question de la fonction « coûts de réduction » globale à long terme n'est peut être pas insaisissable. Mais la nature séquentielle de la décision permet de minorer son importance, en la remplaçant par deux autres, concernant le coût à court terme et la flexibilité à moyen terme.

Les décisions concernant la mise en place des infrastructures économiques comme les réseaux de transports ou de distribution d'énergie, par exemple, peuvent avoir des effets importants sur les politiques futures concernant les émissions de gaz à effet de serre. En effet, des alternatives aux coûts

---

[a] Réaffirmée elle aussi dans la Déclaration de Rio, Principe 15: *Conformément à la Charte des Nations Unies et aux principes du droit international, les Etats ont le droit souverain d'exploiter leurs propres ressources selon leur politique d'environnement et de développement, et ils ont le devoir de faire en sorte que les activités exercées dans les limites de leur juridiction ou sous leur contrôle ne causent pas de dommages à l'environnement dans d'autres Etats ou dans des zones ne relevant d'aucune juridiction nationale.*

peu différents à court terme sont susceptibles de conduire à des configurations de coût de réduction très différentes à moyen terme, sans possibilité de revenir sur aisément sur les choix initiaux.

2.4. Le progrès technique

En cas de révision à la baisse des objectifs d'émissions, une pénétration accélérée des technologies propres serait demandée. La décision séquentielle pose donc une nouvelle question : que faire aujourd'hui pour se ménager une possibilité d'accélération demain ?

Pour répondre à cette question, il apparaît nécessaire de comprendre et de représenter la formation du progrès technique[a] dans le secteur énergétique. Mieux comprendre le phénomène de la baisse dans le temps des coûts de production, et en particulier des coûts des technologies les moins riches en carbone, présenterait de plus un double intérêt. Premièrement, dans le cadre de la modération du changement climatique, les différentes hypothèses sur le progrès technique dans le secteur énergétique à long terme ont des effets sensibles sur le niveau optimal de réduction à long terme. Et deuxièmement, cela apporterait des éléments empiriques utiles à la théorie de la croissance économique en général.

Ce problème du changement technique endogène marque la fin de notre exposé historique des débats, puisque aujourd'hui, la représentation réaliste et cohérente du progrès technique dans les modèles est encore identifiée comme l'un des défis à relever par l'évaluation intégrée[49].

Bien que l'on puisse déjà faire remarquer, par exemple, que les ajustements de droites (Figure 3.6) auxquels Cline procède pour capturer cet effet semblent au moins aussi *ad hoc* que l'introduction d'une technologie backstop[b] dans d'autres travaux, ce n'est qu'au chapitre suivant que nous reprendrons la discussion, notamment en exhibant des éléments empiriques montrant la nécessité de prendre en compte de façon endogène les rétroactions entre les conditions du marché et le changement technique.

[a] Barro et Sala-i-Martin (1995, ch. 6) définissent le progrès technique par les avancées continues dans les méthodes de production ainsi que dans la variété et la qualité des produits.

[b] Une technologie backstop est un terme technique du langage de la modélisation, qui représente une technologie future encore inconnue produisant de l'énergie en quantité illimitée à un coût marginal constant.

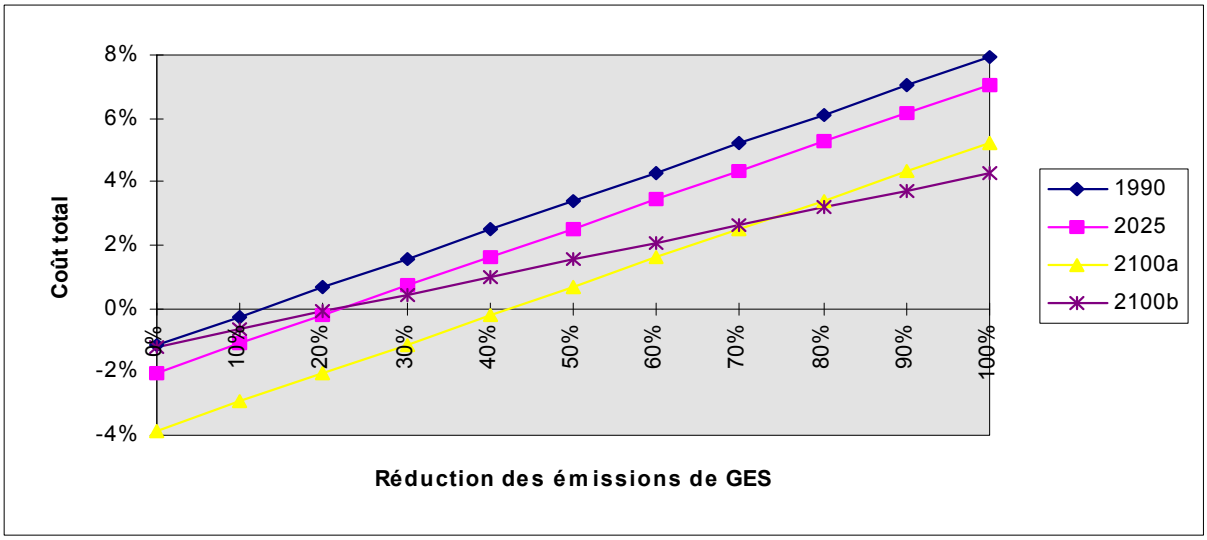


Figure 3.6 : Réduction dans le temps du coût de réduire les émissions.

D'après Cline[50]. En comparant les deux premières courbes, on voit l'effet du progrès technique: la courbe correspondant à 2025 est décalée à droite et en dessous de la courbe de 1990, c'est à dire que les coûts sont inférieurs. La courbe correspondant à 2100a est encore plus à droite et en dessous. Elle coupe l'axe des abscisses à 43%, mesure du potentiel de coût négatif en 2100. Si on prolonge à encore plus long terme le déplacement à droite de la courbe de coût, cela devient irréaliste et poserait problème. La courbe correspondant à 2100b est une façon de contourner ce problème en fixant le potentiel sans regret à 23%. L'effet du progrès technique n'est plus de décaler la courbe vers la droite, mais de la faire pivoter autour du point où elle coupe l'axe des abscisses.

3. Histoire des crises environnementales : la décision sous controverse.

Le problème du changement climatique est sans précédent par son ampleur. Mais ce n'est pas le premier problème d'environnement transnational qui se soit posé. Une mise en perspective à la lumière des crises environnementales précédentes est donc possible et souhaitable. Quelles sont les caractéristiques communes de problèmes tels que la crise du dépérissement des forêts ou celle de l'ozone qui les distinguent des problèmes de décision publique "courants" ?

3.1. Le modèle de décision sous controverse : définition.

Le modèle de décision sous controverse développé au CIRED[51, 52] décrit une classe particulière de situations dans laquelle une collectivité doit faire un choix, prendre une décision. Il ne concerne pas les actes de gestion courante, mais des problèmes plus importants qui impliquent une large part de cette collectivité. Dans toute collectivité, il existe des instances de régulation qui ont pour rôle de prendre ces décisions au mieux. Pourquoi sentons nous que dans le cas de l'ozone, du dépérissement des forêts, mais aussi dans l'affaire du sang contaminé, de l'amiante, de la vache folle, ces instances de décision ont difficilement fonctionné ?

Classiquement, les gouvernements tentent de maximiser l'intérêt collectif en se basant sur l'avis des experts les mieux informés. Or, pour un certain nombre de problèmes, cette conception de la prise de décision n'est pas applicable. En effet, parfois on ne peut plus définir le sens de "intérêt collectif", ni de "expert bien informé".

- Pour définir la notion d'intérêt collectif, il semble nécessaire que collectivité en question existe. Or certains problèmes mettent en jeu le bien-être des générations futures ou distantes. On peut aussi vouloir que la communauté connaisse elle-même son intérêt. Or certains problèmes ne sont accessibles qu'au travers d'instruments scientifiques sophistiqués, d'une façon incompatible avec les principes de base de la démocratie.
- La notion « d'expert bien informé » suppose qu'il existe une théorie unique à laquelle on pourrait accéder plus ou moins profondément, les experts étant des spécialistes qui y accèdent profondément. Or certains problèmes restent encore discutés d'un point de vue scientifique au moment où une décision doit être prise, sans qu'une théorie classique soit déterminée.

Le Tableau 3.4 reprend en détail les caractères qui opposent les problèmes de prise de décision classiques, en univers stabilisé, avec les problèmes de décision sous controverse. Il s'agit là bien entendu de deux cas polaires, la réalité se situant nécessairement entre les deux. Mais les problèmes concrets évoqués plus hauts ont bien présenté, à un certain degré, les caractères de la colonne de droite de ce tableau.

Le problème du changement climatique est clairement controversé: La collectivité dont l'intérêt est en jeu dépasse largement le cadre des électeurs actuels dans les pays industrialisés; les agents n'ont pas de perception directe du changement du climat; le phénomène est difficilement réversible. De plus, on ne peut pas encore considérer que les scientifiques sont d'accord sur tous les aspects importants du problème. La stabilisation des théories sur le changement physique du climat est récente, puisque ce n'est que depuis le second rapport du GIEC, en 1995 donc, que l'on peut affirmer avoir détecté une influence de l'homme sur le climat. Mais du côté des économistes, on peut considérer que les controverses sont encore vives, par exemple en ce qui concerne les effets positifs ou négatifs du changement climatique, ou la valorisation statistique de la vie humaine comme nous l'avons évoqué plus haut.

Prise de décision en univers stabilisé	Prise de décision en univers controversé
Les agents ont une perception directe des effets externes ou des biens collectifs. Leurs préférences sont bien informées.	Prédominance de la construction scientifique et sociale des problèmes sur la perception directe par les agents.
Seuls les intérêts ou préférences des agents présents sont directement pertinents.	La représentation séparée des intérêts de tiers absents est en cause: générations futures, autres pays, espèces naturelles, biosphère.
Ces agents disposent de procédures sociales adéquates pour exprimer leurs préférences : marchés, votes, manifestations et protestations, conflits.	Ils ont des porte-parole contradictoires.
La connaissance scientifique s'est stabilisée sur les aspects des problèmes pertinents pour l'action : Chaînes causales élucidées Dommages bien constitués Imputation des responsabilités dénuée d'ambiguïté	La connaissance scientifique est encore controversée sur les aspects essentiels du problème pertinents pour l'action.
Les phénomènes en cause sont réversibles : on peut attendre un développement suffisant des connaissances pour pouvoir prendre des décisions conformes au modèle de la rationalité substantielle (analyses coûts-avantages).	Du fait de l'irréversibilité potentielle, et du caractère majeur des enjeux, certains acteurs estiment qu'il faut agir immédiatement, sans attendre la stabilisation des connaissances.
Les connaissances scientifiques stabilisées constituent un monde commun pour tous les acteurs, de façon préalable à l'action.	Les théories scientifiques, les "visions du monde et du futur" deviennent des variables stratégiques donnant naissance à de nouvelles formes de compétition.
L'enjeu de la situation : l'efficacité économique et l'équité, sur la base d'intérêts bien constitués.	L'enjeu de cette compétition : la formation de communautés épistémiques et la fixation de conventions d'environnement.

Tableau 3.4 : Prise de décision : univers stabilisé - univers controversé.

Source : Godard[53]

3.2. Le processus de décision collective en univers controversé

Nous pouvons donc rattacher le changement climatique à la classe des problèmes de décision sous controverse. Maintenant, examinons la dynamique de cette classe de problèmes, à l'aide d'une liste de faits caractéristiques que l'on rencontre dans le processus qui mène à la décision.

- Le déclenchement du processus est le fait de lancement d'alertes par des scientifiques ou par des personnalités renommées faisant valoir des considérations scientifiques. Les conséquences sont perçues de prime abord comme potentiellement très dommageables et comme engageant la responsabilité humaine.
- Une controverse scientifique s'installe, donnant à voir des mondes possibles différents. Elle peut durer de quelques années à quelques décennies, mais ressort dans un premier temps de la marche normale de la science.
- La controverse scientifique est versée sur la scène publique et provoque le débat social. Deux facteurs concourent à ce débordement : la disponibilité des médias et le surgissement d'événements spécifiques, si possible catastrophiques, donnant un visage perceptible aux phénomènes en cause.
- Un sentiment d'urgence se répand et presse à agir sans attendre l'issue de la controverse scientifique. Les outils standard de l'analyse économique sont inopérants dans le cadre non déterministe, non probabiliste.
- Les théories scientifiques deviennent une variable stratégique entre les mains des principaux acteurs. Des groupes concernés cherchent à intervenir dans le champ de la controverse normalement réservée aux scientifiques. Cette intervention peut viser soit à clôturer prématurément les débats en imposant une "vérité" donnée, soit au contraire à les faire durer artificiellement. Cela affecte la crédibilité des experts, toute prise de position étant dès lors

suspectée de cacher des intérêts spécifiques.

- Le risque inverse apparaît. L'action publique d'environnement est vue comme menace stratégique par des acteurs économiques, comme une opportunité stratégique par d'autres. A ce stade, on peut observer un basculement dans le processus social : le problème d'environnement, initialement posé pour lui même par les scientifiques, est maintenant vu davantage au travers du couple "menaces-opportunités" indirectes que représentent, pour toutes sortes d'acteurs, les projets d'action envisagés pour le résoudre.
- La convergence finale d'une coalition dominante sur une modalité de réduction de l'incertitude est choisie sur la base des technologies disponibles et des rapports de force entre acteurs sociaux prévalant au moment clé. La convergence est facilitée par le fait que les acteurs économiques recherchent un cadre clair pour réorganiser leur activité à long terme. Les acteurs demandent donc une fermeture du débat par convention.

3.3. Les risques de ce processus

Par rapport aux exigences de rationalité de la décision publique, le processus de décision tel qu'il a été décrit ci-dessus soulève au moins trois difficultés préoccupantes.

Les investisseurs économiques ont un besoin de prévisibilité et de sécurité, et donc d'assurer la durabilité du nouveau cadre fixé à leurs activités. Pour cela, cette fermeture du débat doit être irrévocable, la décision ne doit pas être révisable. Une des solutions pour y parvenir est de miser sur des solutions matériellement et technologiquement lourdes, qui sont ainsi privilégiées. De plus, arrêter des choix techniques peut conduire à bloquer le développement d'innovations qui demanderaient encore du temps pour devenir opérationnelles.

Les résultats de la compétition pour la fixation des règles revient à arbitrer indirectement de la controverse scientifique pour des motifs économiques et politiques. En effet, les règles de conduite arrêtées doivent nécessairement être fixées au regard de certaines hypothèses scientifiques. Les hypothèses retenues correspondent donc à une vision du monde officielle, fixée par convention, qui n'a pas d'autres raison de correspondre à la réalité scientifique établie *ex post*. Si la réponse politique répond vraiment aux termes initiaux ou aux termes finaux de la question d'environnement soulevée, c'est donc par chance.

La vision du monde choisie par convention n'étant pas a priori corrélée avec l'état du monde réel, les acteurs sont confrontés à deux incertitudes : l'issue de la controverse scientifique d'une part, l'issue de la compétition sociale d'autre part. Or pour les acteurs peu susceptibles de ressentir les effets du problème d'environnement, c'est le risque inversé qui prédomine. Dans leur position, qui peut être majoritaire, le problème est donc moins le véritable état du monde que la vision du monde qui s'imposera socialement.

3.4. Une course de vitesse entre deux irréversibilités

L'analyse des mécanismes historiques des crises environnementales fait donc apparaître une course de vitesse entre deux irréversibilités :

- L'irréversibilité des changements ou des ruptures dans l'évolution biophysique en cours, qui exige que l'on apporte une réaction à temps.
- L'irréversibilité qui résulte de la fermeture conventionnelle des possibilités économiques ou technologiques, la focalisation sur certaines options ou filières technologiques façonnant les possibilités techniques et les coûts futurs.

La gestion rationnelle des problèmes d'environnement en univers stabilisé peut se faire en centrant l'analyse sur les coûts et les bénéfices. Ce n'est pas le cas des problèmes d'environnement sous controverse. Pour ceux-ci, il est peut-être plus utile de recentrer le processus de décision autour de la gestion du temps. L'analyse essentielle pour les décideurs n'est-elle pas finalement celle des différents

rythmes qui animent le problème :

- Le rythme d'évolution des phénomènes physiques et écologiques.
- Le rythme de progression des connaissances scientifiques.
- L'évolution de l'opinion publique.
- Le cycle de vie politique rythmé par les échéances électorales.
- Les rythmes de changement du contexte juridique national et international.
- Les rythmes de l'innovation technologique, de la séquence découverte-invention-diffusion.
- Le rythme de renouvellement du capital productif et des infrastructures.

C'est en prenant les décisions à temps par rapport à tous ces facteurs, que le décideur peut arriver à atteindre l'objectif apparemment contradictoire de former une convention sociale à temps pour agir tout en gardant ouvert l'univers des options pour stimuler l'innovation et la variété technique.

4. Conclusion : Comment agir aujourd'hui ?

Au terme de ces chapitres introductif, nous avons montré l'existence, dans le problème de l'effet de serre, de deux irréversibilités opposées : l'irréversibilité environnementale et l'irréversibilité sociale. Godard et Hourcade[54] proposent des principes de gestion des problèmes d'environnement sous controverse, applicables en particulier aux politiques climatiques :

- **Gagner du temps sur les phénomènes :**. Lancer des actions immédiates de façon à infléchir l'évolution des émissions permet de gagner du temps d'apprentissage et de repousser l'échéance à laquelle des engagements plus conséquents et plus irréversibles pourraient devenir incontournables.
- **Améliorer la connaissance :** Développer les programmes de recherche scientifique permet de rapprocher l'échéance à laquelle il sera possible de prendre des décisions bien informées.
- **Préserver la flexibilité :** Eviter les engagements prématurés dans des options techniques, économiques ou institutionnelles trop rigides, comme la relance d'un programme nucléaire massif, la création de nouveaux appareils administratifs lourds...
- **Créer une prévisibilité économique :** Toutefois, mettre en place des incitations, règles du jeu et calendriers visant à instaurer la plus grande prévisibilité économique possible et à guider les anticipations à long terme dont dépendent les trajectoires technologiques.

Aborder la question de l'évaluation des coûts sous l'angle de la double irréversibilité et de la gestion du temps constitue l'originalité de notre approche, qui s'inscrit toutefois dans la lignée des travaux théoriques développés au CIRED sur la décision sous controverse.

***

Références Bibliographiques

[1] Climate Change Secretariat, *UNFCCC official website*, en ligne à http://www.unfccc.de/index.html, accédé le 7/1/98.

[2] Intergovernmental Panel on Climate Change, *official website*, en ligne à http://www.ipcc.ch, accédé le 7/1/98.

[3] United Nations Environment Programme's Information Unit for Conventions, fact sheet last revised 1 May 1993, *The Intergovernmental Panel on Climate Change*, http://www.unep.ch/iucc/fs208.html, accédé le 9/1/98.

[4]United Nations Environment Programme's Information Unit for Conventions, *How UNEP and WMO are responding to climate change*, fact sheet, last revised 1 May 1993, http://www.unep.ch/iucc/fs206.html, accédé le 7/1/98.

[5] United Nations Environment Programme's Information Unit for Conventions, *The First World Climate Conference*, fact sheet, last revised 1 May 1993, http://www.unep.ch/iucc/fs213.html, accédé le 7/1/98.

[6] Commission Mondiale sur l'Environnement et le Développement, *Notre Avenir à Tous*, dit *Rapport Bruntland*, Les Éditions du Fleuve, Montréal, Québec, Canada, 432 pages, décembre 1989. Publié originellement en langue anglaise par Oxford University Press sous le titre *Our Common Future*, 1987.

[7] United Nations Environment Programme's Information Unit for Conventions, *The 1985 Villach Conference and its follow-up workshops on climate change*, fact sheet, last revised 1 May 1993, http://www.unep.ch/iucc/fs214.html, accédé le 7/1/98.

[8] United Nations Environment Programme's Information Unit for Conventions, *The Intergovernmental Panel on Climate Change*, fact sheet, last revised 1 May 1993, http://www.unep.ch/iucc/fs208.html, accédé le 7/1/98.

[9] United Nations Environment Programme's Information Unit for Conventions, *The Second World Climate Conference*, fact sheet, last revised 1 May 1993, http://www.unep.ch/iucc/fs221.html, accédé le 7/1/98.

[10] Climate Change Secretariat, *The United Nations Framework Convention on Climate Change*, http://www.unfccc.de/fccc/conv/file01.htm, accédé le 7/1/98.

[11] Climate Change Secretariat, *National Communications*, résumés destinnés aux décideurs en ligne à http://www.unfccc.de/fccc/docs/nc.htm, textes intégraux à http://www.unfccc.de/fccc/natcom/natcom.htm, accédé le 7/1/98.

[12] United Nations Environment Programme's Information Unit for Conventions, *Climate Change Information Sheet 21, Sharing and reviewing national information*, en ligne à http://www.unep.ch/iucc/fact21.html, accédé le 7/1/98.

[13] Bert Bolin, *The Kyoto Negociations on Climate Change: A Science Perspective,* Science, 279 (5349), 330-331, 16 jan 1998.

[14] Intergovernmental Panel on Climate Change, *official website*, en ligne à http://www.ipcc.ch, accédé le 7/1/98.

[15] United Nations Environment Programme's Information Unit for Conventions, fact sheet last revised 1 May 1993, *The Intergovernmental Panel on Climate Change*, http://www.unep.ch/iucc/fs208.html, accédé le 9/1/98.

[16] United Nations Environment Programme's Information Unit for Conventions, *Why IPCC assessment reports are objective ?*, fact sheet, en ligne à http://www.unep.ch/iucc/fs210.html, accédé 8/1/98.

[17] IPCC Working Group I, *Climate Change - The IPCC Scientific Assessment*, John T. Houghton, G. J. Jenkins, J. J. Ephraums (eds), Cambridge University Press, 0 521 40360 X hardback, 0 521 40720 paperback, 1990.

[18] IPCC Working Group II, *Climate Change - The IPCC Impacts Assessment*, W. J. McG Tegart, G. W. Sheldon, D. C. Griffiths (eds.), Department of the Arts, Sport, the Environment, Tourism and Territories, Australian Government Publishing Services, 0 644 124976. Disponible aussi en français sous le titre *Incidences Potentielles du Changement Climatique*, juin 1990.

[19]IPCC Working Group III, *Climate Change - The IPCC Response Strategies*, F. M. Bernthal (chairman), 1990.

[20] Bo Lim, Pierre Boileau et Yamil Bonduki, *The IPCC/OECD/IEA Greenhouse Gas Inventories Programme: International Methods for the Estimation, Monitoring and Verification fo GHG Emission Inventories*, conférence Goals and Instruments for the Achievement of Global Warming Mitigation in Europe, Umwelt Management Beratung Hacker GMBH, Technical University, Berlin, 20-26 juin 1997.

[21] IPCC, *IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories*, 1994.

[22] IPCC, *IPCC Technical Guidelines for Assessing Climate Change Impacts and Adaptation*, T. R. Carter, M. L. Parry, H. Harasawa et S. Nishioka (eds), published by the Department of Geography, University College London, and the Center for Global Environmental Research, National Institute for Environmental Studies, Tsukuba, Japan, ISBN 0 904813 11 8, 59 pages, 1994.

[23] Daniel Thery, *Experts et Négociation Climat: « Relecture Attentiste » du Cycle du Carbone et Modélisation Intégrée (1990-1996)*, Journées du Programme Environnement du CNRS, Toulouse, novembre 1997.

[24] IPCC, *Climate change 1994, Radiative Forcing of Climate Change* and An Evaluation of the IPCC IS92 Emission Scenarios, J. T. Houghton, L. G. Meira Filho, J. Bruce et alii (eds.), Cambridge University Press, ISBN 0 521 55055 6 hardback, 0 521 55962 6 paperback, 1995.

[25] Joseph Alcamo, Eric Kreileman, *Emission scenarios and global climate protection, Appendix B: Procedure for Computing Safe Emission Corridors,* Global Environmental Change, 6 (4), 305-334, 1996

[26] Jean-Charles Hourcade et Jean Jouzel, *Changement Climatique, du Diagnostic aux Enjeux Economiques. Les Leçons du Deuxième Rapport du GIEC*, Revue de l'Energie, 482, 564-577, novembre 1996.

[27] Jean-Claude Duplessy, *Les Inattendus en Climatologie*, Pour la Science, 237, 10-14, juillet 1997.

[28] IPCC, *Rapport de synthèse*, paragraphe 7.2, 1996.

[29] M. Munasinghe, P. Meier, M. Hoel, S. W. Hone et A. Aaheim, *Applicability of Techniques of Cost-Benefit Analysis to Climate Change*, Chapitre 5, in IPCC Working Group III, *Climate Change 1995 - Economic and Social Dimensions of Climate Change, Contribution of Working Group III to the Second Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, Cambridge* James P Bruce,Hoesung Lee, Erik F Haites (eds) University Press, *0-521-56051-9,* 1996.

[30] IPCC Working Group III, *op. cit.* , paragraphe 8.2.2, 1996.

[31] IPCC, *Mitigation and Adaptation Cost Assessment: Concepts, Methods and Appropriate Use*, Concept paper, second draft, based on a first draft presented at the IPCC/ Risø workshop, 16-18 juin 1997, août 1997.

[32] William D. Nordhaus, *Managing the Global Commons, The Economics of Climate Change*, MIT Press, Cambridge, Massachusetts, p. 62-63, 1994.

[33] IPCC, *Rapport de synthèse*, paragraphe 6.6, 1996.

[34] Arnulf Grubler, *IIASA contribution to Integrated Assessment Modelling of Global Environment Policies and Decision Patterns*, Inasud interim report, 33 pages, CIRED, Juillet 1997.

[35] William D. Nordhaus, *op. cit., page 64*, 1994.

[36] William R Cline, *The Economics of global Warming*, *pages 228-231*, Institute for International Economics, Washington, DC, 399 pages, June 1992.

[37] D. H. Meadows et D. L. Meadows, J. Randers et W. Behren, *The limits to Growth*, Universe Books, New York, 1972. En français : *Halte à la croissance: rapport sur les limites de la croissance*, Fayard, Paris, 1972.

[38] W. Häfele, *Energy in a Finite World*, Ballinger Publishing, Cambridge, MA, 1980.

[39] William D. Nordhaus, *Managing the Global Commons, The Economics of Climate Change*, MIT Press, Cambridge, Massachusetts, 213 pages, 1994.

[40] IPCC Working Group III, *op. cit.* , figure 9.22, 1996.

[41] A. Lans Bovenberg et Ruud A. de Mooij, *Environmental Tax Reform and Endogenous Growth,* Journal of Public Economics, 63, 207-237, 1997

[42] Center for Monitoring Indian Economy, *India's Energy Sector*, p 8, 1996.

[43] IPCC Working Group III, *op. cit., Résumé destiné au décideur*, paragraphe 2, 1996.

[44] IPCC, *Rapport de synthèse*, paragraphe 7.8, 1996.

[45] Olivier Godard (sous la direction de), *Le principe de précaution dans la conduite des affaires humaines*, , Institut National de la Recherche Agronomique et Editions de la Maison des Sciences de l'Homme, Paris, 351

pages, 1996. Cet ouvrage trouve son origine dans les Journées annuelles de l'Association "Natures Sciences Sociétés-Dialogues" qui se sont déroulées en décembre 1994.

[46] Conference des Nations Unies sur l'environnement et le developpement, *Declaration de Rio sur l'environnement et le developpement, Principe 15*, 1992. En ligne à http://www.un.org/dpcsd/docfr.htm, accès 14/1/98.

[47] IPCC Working Group III, *op. cit., Résumé destiné au décideur*, paragraphe 2, 1996.

[48] IPCC Working Group III, *op. cit.*, paragraphes 1.3.2, 2.4.3, 10.5.4, 1996.

[49] John Weyant, *Insights From Integrated Assessment,* in Brian P. Flannery, Klaus R. Koblhase et Duane G. LeVine (eds), Critical Issues in the Economics of Climate Change, proceedings of an IPIECA Symposium held in Paris, France, octobre 1996.

[50] William R Cline, *op. cit., pages 228-231*, 1992.

[51] Olivier Godard, *L'économie de l'environnement, des univers stabilisés aux univers controversés*, La Lettre de la Régulation, 9, 1-3, Godard, dec 1993.

[52] Jean-Charles Hourcade, Jean-Michel Salles, Daniel Thery, *Ecological economics and scientific controversies, lessons from some recent policy making in the EEC*, Ecological Economics, 6, 211-233, 1992.

[53] Olivier Godard, *op. cit.,* 1993.

[54] Jean Charles Hourcade et Olivier Godard, 1991.

Chapitre 4. Des modèles d'évaluation intégrée

Dans ce chapitre, nous allons examiner des *modèles d'évaluation intégrée du changement climatique* (en raccourci dans la suite, modèles intégrés , en anglais IAM, Integrated Assessment Models).

Comme rappelé au début de cette thèse, l'évaluation intégrée consiste à associer des connaissances provenant d'un grand nombre de disciplines pour donner des éclairages qu'il ne serait pas possible d'obtenir par la recherche disciplinaire traditionnelle. Dans ce chapitre 4, nous allons donc passer en revue une littérature à la fois appliquée, interdisciplinaire et aussi quantitative, car les modèles dont il est question sont essentiellement numériques plutôt que conceptuels. Avant ceci toutefois, introduisons le cadre conceptuel général dans lequel s'inscrivent ces travaux.

1. L'évaluation intégrée

Les composants d'un modèle intégré peuvent se représenter graphiquement comme sur la Figure 4.1. Celle ci décrit la structure d'un modèle intégré type, étant entendu que le niveau de détail à l'intérieur de chacune des boîtes peut être très différent d'un modèle à l'autre. Notons que la caractérisation des modèles intégrés donnée plus haut n'exige pas que ceux ci représentent tous les éléments représentés. Sur cette base, Weyant[1] fait donc une distinction significative entre des modèles intégrés *partiels* et des modèles intégrés *complets*. Toutefois, la typologie dessinée dans ce paragraphe démarquera les modèles selon trois autres axes : numérique ou analytique, simulation ou optimisation, coût-avantages ou coût-efficacité.

1.1. Résolution numérique plutôt qu'analytique

Etant appliqués et numériques, les modèles intégrés se distinguent des modèles analytiques utilisés dans l'approche théorique du problème de l'irréversibilité. Nous avons nous même eu l'occasion de constater, à l'occasion de la critique anonyme d'un de nos textes, combien cette distinction était

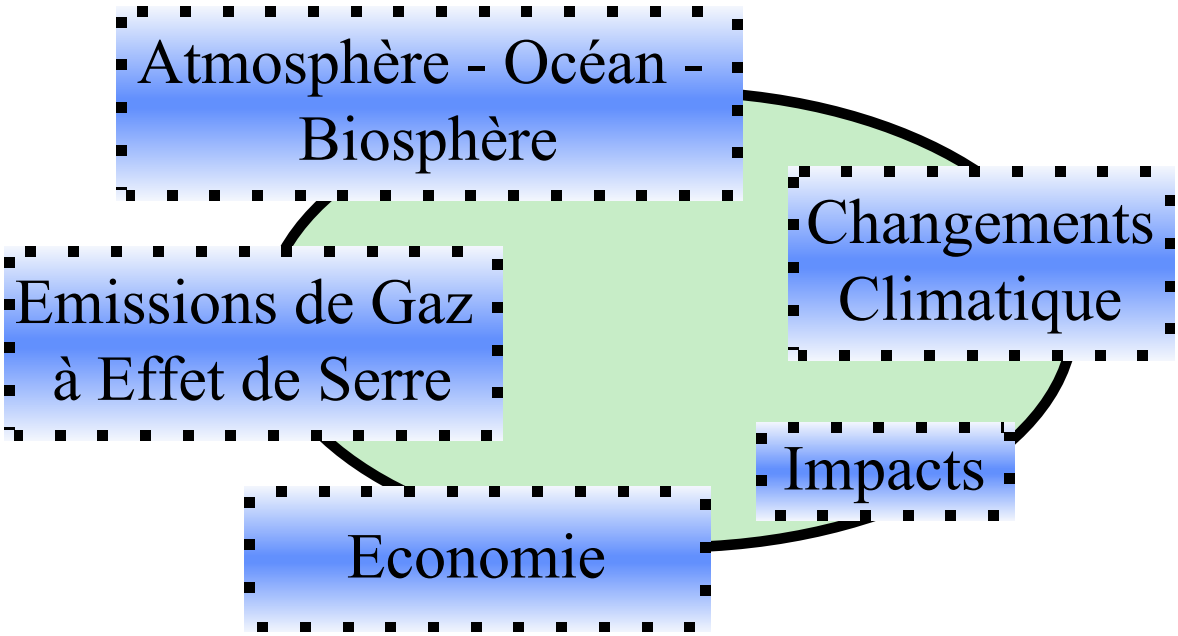


Figure 4.1 : Structure des modèles intégrés.

sensible et contribue de fait à structurer notre communauté scientifique.

Depuis les articles fondateurs publiés simultanément par Henry[2] d'une part, Arrow et Fisher[3] de l'autre, jusqu'à une synthèse plus récente de Treich[4], en passant par Epstein[5], ou Freixas et Laffont[6] et d'autres[7], de nombreux auteurs ont fait progresser le sujet qui relève de la recherche économique fondamentale. Nous ne pouvons détailler suffisamment les apports de cette ligne d'attaque alternative du problème étudié dans cette thèse. Mais en examinant un exemple, nous allons montrer que l'analyse rencontre vite certaines limites, compte tenu de la certaine complexité structurelle intrinsèque des modèles intégrés.

Pindyck[8] a développé un modèle intégré d'optimisation stochastique en temps continu[9], dont les principales équations sont décrites Encadré 4.1. Minimiser la somme actualisée des coûts totaux, revient à rechercher T*, la date optimale d'arrêt des émissions. Cette date est déterminée par un seuil sur le dommage marginal de la concentration θ*. Plus ce seuil est élevé, plus l'arrêt des émissions se produit tard. La sensibilité aux paramètres est alors :

- Lorsque le taux d'actualisation augmente, les dommages futurs diminuent, ce qui augmente θ*.
- Réciproquement, lorsque le niveau courant constant d'émission augmente, les dommages futurs deviennent plus importants, et θ* diminue.
- Lorsque le taux de purification naturel λ augmente, la pollution devient moins irréversible, et donc attendre en continuant à émettre devient une position plus flexible, θ* augmente.
- Lorsque la volatilité σ augmente, le niveau d'incertitude augmente. On a donc intérêt à garder l'option de réduire les émissions ouverte plus longtemps, donc θ* augmente.

Cette approche permet, sur un modèle compact, de mettre en évidence les quatre effets énumérés ci dessus, non intuitifs *a priori*. Cependant, il nous semble que le niveau de technicité mathématique de ce genre d'exercice pose le problème de la transparence conceptuelle, limitant le contrôle scientifique et la réutilisation ou l'extension du modèle, et limitant surtout la transmissibilité politique immédiate des résultats.

Les émissions E_t sont constantes jusqu'à la date T, nulles après. À cette date, le coût d'arrêt des émissions est K.

$$B_t = \theta_t M_t$$

Les dommages climatiques B_t sont le produit de M_t , l'excès de concentration au dessus d'un équilibre préindustriel, par un facteur de dommage θ_t

$$d\theta = \alpha\, \theta\, dt + \sigma\, \theta\, dz$$

Le facteur de dommage θ_t suit un mouvement brownien géométrique, dz étant le processus de Wiener.

$$dM_t/dt = \gamma E_t - \lambda M_t$$

La concentration suit une dynamique du premier ordre forcée par les émissions E_t.

Encadré 4.1 : Modèle de Pindyck.

Ces raison permettent peut être d'expliquer pourquoi communauté de la modélisation intégrée se définit aujourd'hui par un usage prononcé du calcul numérique. Toutefois, la dichotomie suggérée par le titre se relativise depuis la banalisation du calcul symbolique sur ordinateur. Il ne s'agit donc pas de définir des écoles, mais de remarquer que chacun réalise dans son travail un cocktail entre calcul analytique à la main, calcul formel automatisé et calcul numérique. Ce mélange ne peut se doser judicieusement qu'en fonction d'une part du problème à résoudre, de l'autre des compétences et des moyens à disposition.

Ce cadre résolument numérique impose, à côté des aspects théoriques de l'économie du problème étudié, des problèmes techniques non triviaux comme celui de la convergence des algorithmes utilisés, par exemple, qui ne se posent pas dans un cadre analytique. Beaucoup de modèles intégrés, qui sont déjà à la frontière de la recherche en économie, font également appel à des méthodes informatiques pointues, par la taille ou la non linéarité des problèmes étudiés. Il est sera important de noter dans la revue qui va suivre que, bien que le but final soit pratique, certains modèles ont en plus une grande valeur en tant avancée méthodologique, comme DICE ou comme ICLIPS.

La clarification méthodologique est d'autant plus importante que la résolution numérique permet

d'écrire des modèles relativement détaillés, comme MERGE 3, qui décompose le monde en 9 régions échangeant 5 biens jusqu'en 2200, avec 9 technologies de production d'électricité par exemple. Ces 'grands' modèles posent en des termes différents le problème de la transparence.

Pour les modèles analytiques, la transparence signifiait d'abord une certaine accessibilité de la preuve et une définition claire des concepts employés. Pour les grands modèles ayant vocation à rendre compte beaucoup plus concrètement de la réalité, la transparence signifie d'abord que l'on identifie clairement les technologies de production mises en oeuvre, ainsi que les flux et les stocks des divers biens envisagés. Une fois ce point de vocabulaire éclairci, deux autres problèmes méthodologiques se posent : le contrôle scientifique et la cohérence interne.

Dans la mesure où des imprécisions de programmation sont inévitables mais peuvent avoir des grandes conséquences sur les résultats, et que la vérification du code source par une équipe indépendante demanderait un travail irréalisable en pratique, les résultats d'un modèle isolé ne peuvent pas avoir la force du théorème prouvé par une démonstration mathématique.

En ce qui concerne la cohérence interne, il est important de faire savoir que la qualification de modèle « intégré » s'applique à beaucoup de modèles constitués de sous modules faiblement couplés, qui ne peuvent pas offrir les mêmes garanties que d'autres modèles pensés monolithiquement dès le départ.

Il n'existe pas de méthodologie unifiée pour les modèles intégrés qui permettrait de résoudre de façon satisfaisante tous ces problèmes de méthode, tout en traitant la question de fond. La variété des langages de programmation et d'interfaces est représentée Tableau 4.1. Nous allons montrer dans la suite comment cette variété peut être orientée par un axe qui reflète aussi des différences de culture entre les équipes de recherche.

Langage	Modèles
GAMS	MERGE, DICE, ALICE
Mathematica	DIAM
PASCAL, FORTRAN 90	FUND, MiniCAM, PAGE
STELLA, langage propriétaire (M, DEMOS)	IMAGE, TARGETS, ICAM

Tableau 4.1 : Modèles intégrés et leur environnements de programmation.

Le langage GAMS est conçu pour pouvoir spécifier et résoudre de grands problèmes d'optimisation sous contraintes, linéaires ou non. Le langage Mathematica *est un outil de calcul symbolique pour faire des mathématiques par ordinateur. Pascal et Fortran 90 sont des langages de programmation généraux, à la fois souples et performants. STELLA est un langage qui permet de simuler les processus d'évolution de systèmes compliqués, à la façon dont un ingénieur décrit le fonctionnement d'une usine.*

1.2. Simulation ou optimisation

L'interdisciplinarité signifie que des climatologues et des économistes construisent des modèles pour examiner le problème du changement climatique. Mais existe-t-il une approche commune de la modélisation ? On peut en effet discerner dans les modèles existants deux tendances qui correspondent à peu près à la spécialisation plutôt physicienne ou plutôt économiste de l'équipe qui les a construits[10].

Pour analyser une question comme « Quelle sera la magnitude du changement climatique ? » , et une autre comme « Pourquoi et comment construire une coopération internationale pour réduire les émissions ? », il est en effet nécessaire de recourir à deux conceptions opposées de la temporalité.

Les modèles physiques reflètent le principe fondamental de causalité : les causes se produisent avant les effets. En conséquence, on peut décrire les systèmes au moyen d'équations différentielles ou d'équations au différences finies, pourvu que l'on spécifie les conditions initiales. Une fois ces équations écrites, le calculateur peut procéder en s'intéressant successivement à l'état à la date 1, puis

à la date 2, et ainsi de suite. On peut qualifier cette façon de calculer de "récursive". A chaque instant, l'état du système est déterminé en fonction du *passé*.

Un grand nombre de modèles économiques sont aussi récursifs, comme par exemple WorlsScan[11]. Mais certains, et nous allons en examiner beaucoup dans la suite, sont très différents. La valeur fondamentale d'une action, par exemple, s'obtient comme la somme des dividendes *futurs*. En économie et en sciences sociales, les objets que l'on étudie sont des agents intelligents qui prennent leurs décisions en pensant aux conséquences, il existe donc des anticipations et des buts qui déterminent l'évolution du système. La prise en compte des anticipations est un point très importants en économie, notamment depuis Lucas[12]. En première approximation, on peut par exemple supposer que les agents sont parfaitement clairvoyants, ce qui n'est pas sans conséquence sur la maximisation de leur utilité intertemporelle.

Donc, beaucoup de modèles économiques sont des modèles d'optimisation intertemporels. Numériquement, les problèmes d'optimisation intertemporels se résolvent en considérant le vecteur d'états $\mathbf{V} = (S_1, S_2, .. , S_T)$, que l'on doit traiter comme un tout. On ne peut plus organiser le calcul par périodes, récursivement, mais on doit tout calculer d'un coup, intertemporellement. Le calcul devient alors plus difficile que pour la simulation puisque le nombre de variables est multiplié par T. En conséquence, à capacité de calcul égale, les modèles de simulation seront moins détaillés que les modèles d'optimisation.

Au moyen d'une simulation du comportement du système, les sciences physiques cherchent à faire des prédictions sur ce qui se passera dans le futur. Les modèles socio-économiques à long terme ne cherchent pas à prédire, mais à projeter une vision du futur qui a plusieurs particularités: Le scénario projeté doit être cohérent dans son ensemble. Il doit être compatible avec ce que l'on sait extérieurement. Et si possible, il ne doit pas y avoir de gaspillage, le scénario doit être optimal. Le Tableau 4.2 synthétise les différences conceptuelles entre les modèles climatiques et les modèles socio-économiques, différences persistantes quand les équipes étendent ou combinent ces modèles pour en faire des modèles intégrés.

Il n'y a pas de frontière nette entre les modèles de simulation et les modèles d'optimisation. On peut en effet noter que la différence ne porte pas sur les équations des modèles, mais seulement sur la façon de les résoudre. Il est possible d'utiliser en simulation des modèles d'optimisation, comme l'ont fait remarquablement Wigley, Richels et Edmonds[13]. C'est aussi nécessaire pendant le processus de développement du modèle, pour savoir comment il se comporte. Il est aussi possible de résoudre en optimisation un modèle de simulation, bien que cela représente une tâche informatique exceptionnelle. Le module TIME-CYCLES[14] du modèle IMAGE, par exemple, peut s'optimiser à l'aide d'un algorithme génétique spécial.

Si les modèles intégrés sont par nature au confluent des deux traditions définies ci dessus, on peut encore en distinguer deux types. Chacun peut être classé *a priori* selon le langage de programmation utilisé pour le développement. La variété des langages utilisés pour construire les modèles intégrés (voir Tableau 4.1 page 107) s'organise sur une échelle allant de GAMS, spécifiquement construit pour représenter des programmes d'optimisation, à STELLA, dédié à la simulation. On a aujourd'hui :

- Des modèles d'analyse des politiques par simulation , qui sont souvent les plus régionalisés et les plus détaillés, comme le modèle IMAGE[15].
- Des modèles d'optimisation des politiques, comme DICE[16] ou Global 2100[17].

Climat	Socio-économie
Monde fini	Croissance
Prédiction	Projection
Causalité	Anticipation
Simulation	Optimisation
Récursif	Intertemporel

Tableau 4.2 : Différences modèles Climatiques - modèles Socio-économiques

Une troisième classe de modèles se dessine. A côté des modèles de contrôle *optimal*, il existe en effet quelques modèles de contrôle *viable*[18], comme ICLIPS[19]. Le contrôle optimal recherche l'unique stratégie qui maximise un objectif tout en respectant des contraintes dans le temps. Le contrôle viable définit un ensemble de stratégies qui respectent des contraintes, dans le temps également. A l'heure actuelle, la

viabilité a néanmoins comme handicap par rapport à l'optimisation d'offrir infiniment moins d'outils informatiques généraux et performants clés-en-main comme GAMS.

Chaque tradition présente ses avantages et ses défauts objectifs. Les modèles de simulation tendent à avoir des comportement extrêmes de type "overshoot and collapse", alors que les modèles d'optimisation sont souvent plus stables, bien que plus techniques à résoudre. La simulation conduit aussi souvent à des modèles détaillés, qui comportent nécessairement un certain nombre de paramètres arbitraires et demandent beaucoup de ressources humaines.

D'un côté, les modèles d'optimisation supposent des agents parfaitement clairvoyants, hypothèse peu réaliste. Mais de l'autre, les modèles de simulation reviennent à modéliser le comportement des agents. Cela implique l'hypothèse tout autant discutable selon laquelle le modélisateur dispose de plus d'information qu'eux sur le système. Ce dernier argument, classique[20], introduit toutefois une discussion sur la nature des 'agents' modélisés.

On peut en effet voir trois types d'agents dans la modélisation intégrée[21] : le monde physique régit par des lois causales, les agents économiques privés régis par l'optimisation de l'utilité ou du profit, et des instances publiques supérieures de régulation chargées de l'intérêt général, qui pourrait relever de la viabilité. Les travaux de Matarasso et Courrège[22] au CIRED tendent actuellement à cerner la question dans un cadre d'optimisation en temps discrets, mais on peut aussi envisager d'utiliser des modèles à génération imbriqués que nous n'étudierons pas ici, dans la mesure où il s'agit d'une classe de modèles intégrés relativement nouvelle[23, 24, 25, 26, 27].

Ces considérations sur les différences objectives entre la simulation et l'optimisation ne doivent cependant faire oublier l'importance de la différence culturelle évoquée au début de cette section. On pourrait par exemple rattacher le modèle décrit plus bas dans cette thèse, inspiré de DICE, à une tradition d'optimisation en économie remontant à Ramsey[28].

1.3. Optimisation coût-bénéfice ou coût-efficacité

Examinons plus spécialement les modèles d'optimisation. S'il était nécessaire de justifier la sous optimalité de la situation qui découlerait de l'équilibre des marchés, il suffirait de rappeler que la pureté de l'atmosphère est un bien commun[29] de l'humanité en accès libre, non appropriable, et que la pollution met en jeu le bien être de générations très éloignées. Mais la nécessité d'une instance publique pour protéger l'intérêt général ne fait plus de doutes depuis longtemps.

Relativement à la question de la régulation, précisons que les modèles d'optimisation visés dans ce chapitre déterminent un optimum de Paréto en faisant abstraction des moyens à mettre en oeuvre pour l'atteindre. La question des instruments, taxes, normes, permis échangeables, accords volontaires ou autres, est tout aussi importante que la question des objectifs, mais nous ne l'examinerons pas dans cette thèse. Signalons aussi que ces modèles se détachent des questions d'équité, de développement, de démographie et de beaucoup d'autres, n'ayant pas vocation à intégrer l'ensemble complet des paramètres pris en compte par les décideurs.

Pour situer les apports des modèles, il est fondamental de distinguer l'analyse coût-bénéfice (dite aussi coût-avantages, ACA en français et cost-benefit analysis ou CBA en anglais) de l'analyse coût-efficacité.

- Dans les modèles coût-efficacité, un objectif de politique climatique est donné et on cherche à minimiser le coût des mesures prise pour l'atteindre.
- Dans un modèle d'analyse coût-bénéfice, l'objectif de politique climatique est calculé à partir d'une comparaison entre les coûts de réduction et l'évaluation des dommages climatiques évités.

Des modèles qui se fixent une cible en concentration de gaz à effet de serre spécifiant une date de stabilisation et un plafond final peuvent se classer dans la première catégorie. D'autres modèles se placent en coût-bénéfice et ignorent délibérément toute contrainte de stabilisation. Cela pourrait se justifier au motif que à long terme, même l'article 2 de la Convention Climat pourrait être renégocié, ou alors en imaginant que le niveau de stabilisation sera atteint par le haut, après une période

temporaire de dépassement. On peut imaginer des intermédiaires entre ces deux types de modèles, par exemple un modèle peut imposer la stabilisation à date fixée mais tout en calculant la concentration finale.

Historiquement, les modèles coût-efficacité ont d'abord permis d'obtenir des résultats intéressants qui ne dépendaient pas de la résolution des deux difficultés majeures que sont l'actualisation d'une part, et la représentation des impacts du changement climatique de l'autre. Dans un second temps, ces difficultés ne pouvant être éludées sur le fond, les modèles ont pu être étendus en coût-bénéfice à partir des années 1994, comme l'illustre le passage de Global 2100 à MERGE 2[30].

Dans cette thèse, nous utiliserons les deux méthodes. Le chapitre 5 procédera de l'analyse coût-bénéfice, le chapitre 6 du coût-efficacité. Dans le chapitre 7, les deux approches seront utilisées.

A l'issue de cette typologie en trois axes des modèles, il apparaît que la différence la plus prégnante est peut être celle entre les modèles d'optimisation des politiques et les modèles d'évaluation des politiques, puisque tous les modèles qui nous intéressent sont plus numériques qu'analytiques, et que l'autre axe étudié ne concerne pas les modèles de simulation.

2. Modèles d'optimisation

Les modèles intégrés que nous allons passer en revue ne représentent pas la totalité de la production actuelle, mais sur le thème qui nous intéresse, à savoir la prise en compte de l'irréversibilité, ils représentent la large majorité des travaux publiés. Compte tenu de l'actualité du changement climatique et de l'intensité de la recherche, certains modèles plus récents ne seront examinés que très brièvement, et nous ne discuterons pas les projets en cours, comme par exemple celui du MIT[31].

La revue est organisée sur deux paragraphes, en suivant la différence optimisation-simulation exposée plus haut. Les modèles intégrés exposés dans ce paragraphe présentent une unité forte : ils sont écrits dans le même langage, GAMS, et sont soumis à des comparaisons systématiques organisées au sein du programme de recherche « Energy Modelling Forum 14, Climate impact and Integrated assessment of climate change ».

Nous examinerons en premier DICE, écrit par William D. Nordhaus[32], qui est sinon le modèle de référence pour l'évaluation intégrée du changement climatique, du moins un des pionniers. Puis nous examinerons deux modèles qui en dérivent pour l'essentiel, de Kolstad et Yohe. Enfin, nous verrons MERGE et une de ses variantes par Peck et Teisberg.

2.1. DICE - Nordhaus

Il s'agit d'un modèle en coût-bénéfice, qui maximise l'utilité intertemporelle actualisée dans un contexte d'équilibre général entre l'investissement et la consommation, tous deux agrégés au niveau le plus global. Une des grandes forces de ce modèle est que tous les paramètres sont discutés dans en détail dans le livre, ce qui assure une transparence relativement élevée. Dans cet ouvrage, l'auteur accorde la majorité de son attention au risque et à l'incertitude.

Dans le changement climatique, beaucoup de paramètres sont incertains. La multiplication combinatoire fait que les modèles rencontrent rapidement des limites de maniabilité. Si par exemple il y a 8 paramètres incertains, et que la distribution de chacun est représentée à l'aide de 5 valeurs, on obtient 5^8 soir 390 625 scénarios en les combinant tous. Pour contourner les difficultés en temps de calcul, exploitation et représentation des résultats, Nordhaus se ramène à un petit nombre de scenarii, judicieusement construits pour représenter la distribution d'incertitude des paramètres. Il procède pour cela en trois étapes.

1. La première est une analyse systématique de la sensibilité des résultats par rapport aux 24 paramètres du modèle. Elle permet de sélectionner les huit paramètres dont les variations influencent le plus le résultat. Les paramètres correspondant correspondent au lignes du Tableau 4.3.
2. La seconde étape est une analyse de Monte Carlo. L'auteur commence par formuler, en s'appuyant

sur les études d'experts lorsque cela est possible, la distribution de probabilité associée à chacun de ces paramètres. Ces distributions sont supposées indépendantes entre elles, et chacune est représentée par ses quintiles, soit 5 valeurs. Ensuite, un échantillon de 500 octuplets est tiré parmi les 5^8 possibles. Le modèle est résolu pour les 500 scenarii correspondant. Cela produit les distributions pour les différents résultats du modèle comme le niveau de taxe sur le carbone ou le niveau de réduction des émissions.

3. La troisième étape consiste à définir effectivement les scénarios représentatifs. Un index de sévérité du changement climatique, le produit de la taxe optimale par la réduction optimale, est défini et calculé pour chaque solution. Les scenarii sont ensuite rangés selon cet index et stratifiés en 5 classes (Figure 4.2). Pour chaque classe, le scénario définissant l'état du monde correspondant est obtenu en moyennant tous les octuplets de la classe.

Paramètre	Valeur de référence	SOW1	SOW5
Déclin du taux de croissance de la population *(vitesse à laquelle la population se stabilise)*	0,195	0,027	0,204
Déclin du taux de croissance de la productivité *(vitesse à laquelle la productivité technique A dans $Q = \Omega\ A\ K^{0.25}\ L^{0.75}$ se stabilise)*	0,110	0,074	0,106 *0.123*
Taux social de préférence pure pour le présent *(taux d'actualisation de l'utilité)*	3%	1,2%	3,3%
Taux de décroissance du ratio émissions/production *(progrès technique autonome dans le secteur polluant)*	-0,117	-0,117 *-0,110*	-0,124 *-0,128*
Intercept de la fonction de dommage θ_1 *dans* $D = \theta_1\ Q\ T$	1,3%	1,7% *2,4%*	0,6%
Sensibilité de la température au forçage radiatif $\Delta T(2\times CO_2)$	2,908	3,808	2,656
Intercept de la fonction de coût de réduction b_1 *dans* $T_C = b_1\ Q\ \mu^{2.887}$	6,9%	6,7% *7.2%*	6,7% *6.4%*
Taux de rétention atmosphérique du CO_2 à court terme β *dans* $M' = \beta\ E + ...$	64%	67,7%	63,5%

Tableau 4.3 : DICE, paramètres incertains influant le plus sur la sévérité.

D'après Nordhaus, 1994, p. 166. Tableau dans l'ordre de sensibilité décroissante. SOW1 représente l'état du monde dans lequel la réponse optimale au changement climatique est forte, et SOW5 celui dans lequel elle est faible. Les valeurs en italiques correspondent aux valeurs extrêmes des paramètres lorsqu'elles occurrent dans SOW2, 3 ou 4.

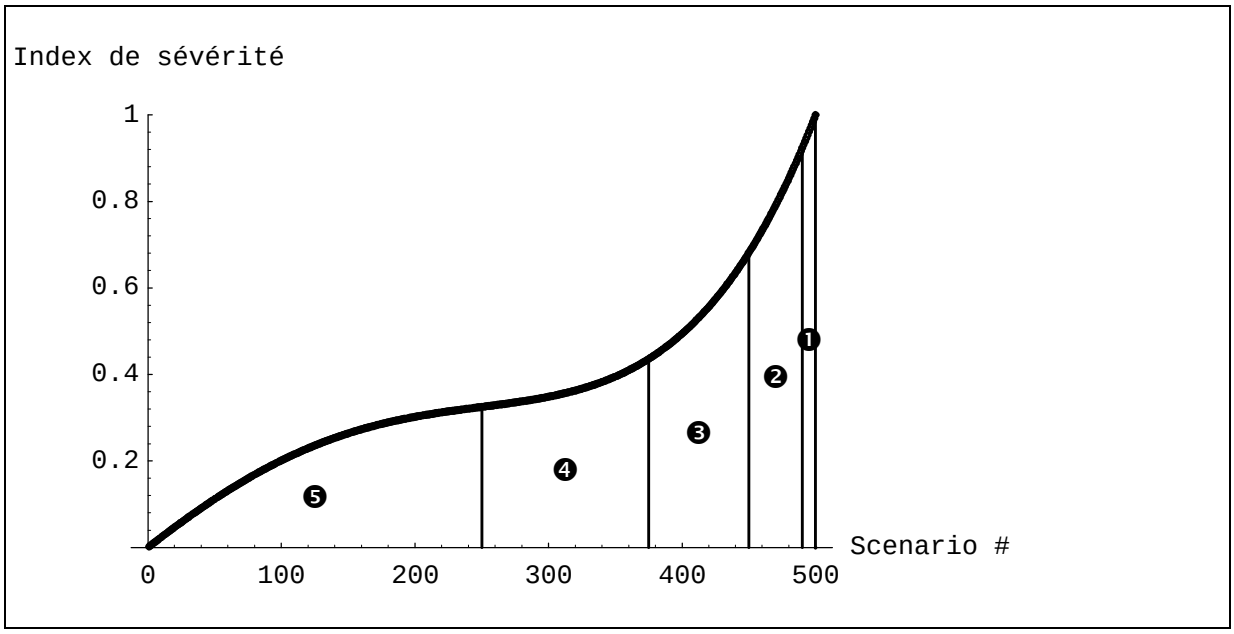


Figure 4.2 : DICE, Distribution stochastique de l'indice de sévérité.

Stratification de l'échantillon en 5 classes servant à déterminer les 5 scenarii représentatifs. La largeur des classes est : 50%, 25%, 15%, 8%, 2%. La classe 1, par exemple, comprend les 10 scenarii qui impliquent les politiques climatiques les plus fortes, et comme le modèle est relativement linéaire, le scénario correspondant à la moyenne des paramètres ces 10 scenarii est bien représentatif de cette classe. Le Tableau 4.3 donne les valeurs des paramètres pour les états du monde 1 et 5, ainsi que les valeurs extrêmes obtenues sur les 5 états du monde.

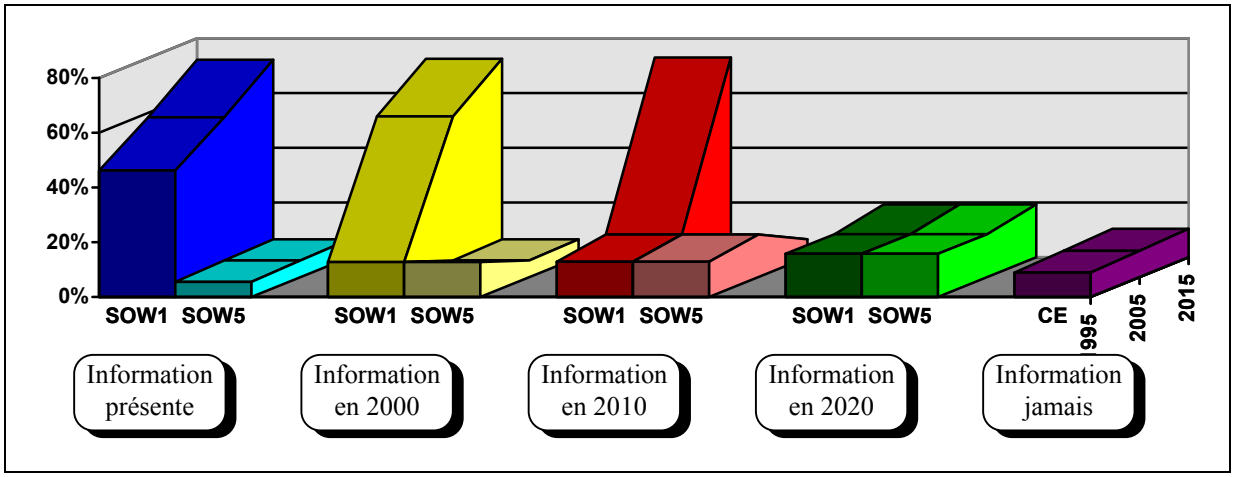


Figure 4.3 : DICE, Impact de l'incertitude sur les niveaux de réduction optimaux.

Niveau de réduction optimal pour l'année 1995, 2005 et 2015. Comparaison du cas favorable SOW5 et de cas calamiteux SOW1, pour cinq dates d'arrivée de l'information. D'après Nordhaus, 1994, p. 181.

Une fois ces cinq états du monde définis, DICE est résolu en programmation dynamique stochastique pour différentes dates d'arrivée de l'information : 1990, 2000, 2010, 2020, jamais. Nous discuterons ici en particulier trois résultats concernant les niveaux optimal de réduction d'émission représentés Figure 4.3, étant entendu que le modèle fournit aussi des informations sur la taxe optimale et le taux d'épargne optimal que nous n'examinerons pas ici.

- Le profil de réduction le plus à droite, noté « CE », correspond au scénario Équivalent Certain, c'est à dire que les paramètres sont la moyenne des paramètres des 5 états du monde. Le sentier optimal est alors de réduire les émissions de 8,8% à la première période, puis reste quasiment stable à ce niveau pendant les deux périodes suivantes.

- La présence d'incertitude accroît le niveau de réduction optimal d'environ la moitié. Cela apparaît en comparant le bloc "CE" avec ses voisins : la réduction à court terme atteint 8,8% des émissions, contre 12,7% quand l'information arrive en 2000.
- Les niveaux de réduction optimaux après résolution de l'incertitude sont indépendants de la date de résolution de l'incertitude. Cela apparaît en comparant par exemple la hauteur des trois blocs les plus élevés à gauche, qui correspond uniformément à un niveau de réduction de 72% pour la période 2010-2020 dans le cas calamiteux.

Le premier et le troisième résultats peuvent surprendre. Il semble en effet que les coûts d'ajustement devraient conduire à étaler davantage les efforts de réduction dans le temps à l'optimum, plutôt que d'avoir des sauts rapides importants. Cela pourrait provenir du fait que DICE ne représente qu'une forme de capital, qui se déprécie au taux élevé de 5% l'an.

Le troisième résultat pose la question de la régularité de la fonction de dommages climatiques. Dans DICE, l'avantage marginal des réductions d'émission ne dépend quasiment pas des efforts passés[a], et donc le niveau optimal de réduction non plus.

Ces deux effets nous conduisent à penser que les deux irréversibilités caractéristiques et opposées du problème (environnement et investissement) sont donc sous estimées, ce qui diminue la force de conviction du second résultat.

2.2. SLICE - Kolstad

L'étude précédente permet donc de comprendre la fragilité de la remarque du GIEC : « *Les évaluations coût-bénéfices axées sur l'incertitude qui ont été effectuées jusqu'à présent arrivent à des taux de réduction optimaux plus élevés que les modèles coûts-bénéfices déterministes* »[33], et pourquoi Kolstad[34, 35, 36, 37] a pu la contredire en reprenant directement les équations de DICE.

L'auteur étudie l'effet sur la réduction optimale à court terme de la tension entre les deux irréversibilités. Pour cela, il suppose que les dommages climatiques sont soit nuls, avec probabilité 4/5, soit égaux à cinq fois la valeur de référence de DICE, avec probabilité 1/5. Le dommage espéré est donc égal à la valeur de référence de Nordhaus.

Mais au lieu de résoudre toutes les incertitudes à une date fixée, les probabilités subjectives sont révisables plusieurs fois, en 2005 et 2015. Le modèle représente la vitesse d'apprentissage par un paramètre λ compris entre 0 et 1, tel que 0 représente l'absence d'apprentissage (cas équivalent certain) et 1 la résolution de toutes les incertitudes en une période.

L'irrécupérabilité des dépenses de réduction est prise en compte par un paramètre δ , qui limite la réduction d'émission en GtC à la période t à $(1-\delta)$ la réduction à période précédente. Pour $\delta = 0$, la réduction est donc monotone croissante, ce qui traduit le fait que le capital mis en place pour réduire les émissions à la période t - 1 est encore en opération à la période t. Pour $\delta = 1$, il n'y a pas de contrainte, et les émissions peuvent repartir à la hausse librement même après avoir été fortement réduites pendant plusieurs périodes.

Les résultats représentés Tableau 4.4, montrent qu'une vitesse d'apprentissage plus élevée augmente les émissions optimales, et ce d'autant plus que les coûts de réduction sont irrécupérables :

	réductions réversibles $\delta = 1$	cas intermédiaire $\delta = 0.5$	réductions irréversibles $\delta = 0$
pas d'apprentissage, $\lambda = 0$	7.3%	7.3%	7.3%
apprentissage moyen, $\lambda = 0.5$	7.3%	7.2%	6.8%
apprentissage rapide, $\lambda = 1$	7.3%	7%	5%

Tableau 4.4 : Niveau de réduction optimal en 1995 - Kolstad 1994.

[a] Par la concentration de gaz à effet de serre résultant d'un processus d'accumulation long, réduire les émissions de 10% pendant 20 ans a finalement très peu d'effet.

Taux de préférence pure pour le présent : 3%. Avec un taux de 1% les niveaux de réduction sont multipliés par deux homothétiquement, ce qui ne change donc pas la nature qualitative des conclusions.

- Quand les réductions sont réversibles (δ=1), tenir compte de l'incertitude ne change rien.
- Dans l'autre cas (δ=0), contrairement à DICE c'est l'absence d'apprentissage (λ=0) qui augmente la réduction optimale de moitié.

Le cas δ=1 correspond à DICE. L'absence d'effet de l'incertitude, qu'on ne trouvait pas avant, appelle donc une explication. Cela provient du fait que dans le modèle de Kolstad, l'incertitude est sensiblement plus « petite » que dans DICE, et donc le théorème de Malinvaud[38] sur les petites incertitudes s'applique.

Pour comparer la « grandeur » de l'incertitude dans les deux modèles, deux remarques suffisent. Premièrement, dans DICE, huit paramètres variaient pour cinq états du monde, dans Kolstad l'incertitude ne concerne qu'un paramètre (l'intercept de la fonction de dommage noté θ_1 précédemment) pour deux états possibles. Deuxièmement, l'amplitude de l'incertitude concernant ce paramètre reste comparable dans les deux modèles, entre 0.6 et 2.4 pour DICE, soit du simple au quadruple, et du simple au quintuple dans le modèle de Kolstad.

Le modèle de Kolstad accorde donc encore moins de poids que DICE aux hypothèses de dommages climatiques extrêmes défavorables. Or, nous avons déjà montré que la pertinence de la représentation des dommages dans ces modèles pouvait être mise en question. A ce stade, nous pouvons quand même supporter la mise en question ci dessus à l'aide du sondage d'experts de Nordhaus[39] . Ce sondage permet d'estimer l'amplitude de l'incertitude sur θ_1 de 1 à 7,8 , celle ci se doublant d'une autre incertitude importante sur la sensibilité de la température à l'augmentation du forçage radiatif.

Une fois le cas δ=1 expliqué, le cas δ=0 se comprend directement : la contrainte ajoutée provoque un effet d'irréversibilité de l'investissement qui ne peut que tendre à retarder les efforts pour attendre d'avoir de l'information.

Il apparaît en somme que relativement à DICE, Kolstad à diminué l'irréversibilité climatique, qui était déjà sous estimée, et augmenté l'irréversibilité de l'investissement, ce explique le retournement du résultat concernant l'effet de l'incertitude.

Les incertitudes actuelles, évoquées à maintes reprises aux chapitres précédents, ne permettent pas de poser de bases empiriques solides pour évaluer les bénéfices des actions visant à modérer le changement climatique. Comme le dit Weyant[40]:

> *The biggest challenges facing integrated assessment modellers are: (1) developing a credible way to represent and value the impacts of climate change; ...*

Cette difficulté est la source de l'opposition entre les résultats des deux modèles coût-bénéfices que nous venons de passer en revue. Nous reviendrons ultérieurement, une fois instrumentés avec DIAM au chapitre 7, sur le problème de la forme de la fonction de dommages climatiques.

2.3. Connecticut - Yohe

Au premier abord, il pourrait semble qu'un modèle en coût-efficacité permet de mieux prendre en compte l'irréversibilité environnementale. Cependant, Yohe et Wallace[41] ont montrer dans ce cadre, à l'aide du modèle Connecticut (YOHE), que le niveau de taxe optimal à court terme est zéro.

Il s'agit d'un modèle cousin de DICE, plus sophistiqué puisque représentant explicitement deux types d'énergie, fossile et non fossile. Les auteurs examinent les chemins d'émission qui minimisent les coûts de réduction, étant donné un plafond sur le niveau de concentration. Ils prennent en compte deux incertitudes, sur ce *plafond* d'une part, et sur les *scénarios* socio-économiques futures de l'autre. Cette dernière est représentée par sept scénarios comparables aux cinq SOWx de DICE. Les scénarios 6 et 7, de probabilité 5% et 4%, sont ceux pour lesquels les réductions sont les plus chères, les émissions de référence étant élevées.

L'incertitude sur les dommages est représentée par un éventail des 7 plafonds de concentration régulièrement distribués entre 550 et 850ppm. On vise d'abord un plafond *i*, mais ce choix est révisé en 2020 et devient définitivement *k*, avec équiprobabilité pour les 7 plafonds.

	Scénario *j*	1	2	3	4	5	6	7
Incertitude sur	Plafond initial optimal *i**(*j*), ppmv	850	850	850	850	850	800	700
le plafond	Coût correspondant, %PNB mondial 1990	0.00	0.67	1.97	5.64	21.21	25.16	32.49
seulement	Surcoût si on commence par viser 550ppm	0%	15%	18%	1%	6%	4%	3%
Incertitude plafond	Coût espéré avec la trajectoire initiale optimale pour *j* (visant *i**(*j*) entre autres)	6.62	6.62	6.72	6.81	7.08	7.20	7.61
et scénario	Coût dans les mêmes conditions, mais distribution équiprobable des scenarii	13.4	13.4	13.3	13.6	13.7	13.8	14.0

Tableau 4.5 : YOHE, Coût espéré de stabilisation de la concentration.

Coûts espérés de diverses stratégies de réduction (% PNB mondial 1990. 1 point représente à peu près 210G$). Le seuil final, uniformément réparti entre 550 et 850ppm, est déterminé en 2020. Les utilités sont actualisées au taux de préférence pure pour le présent de 3%. D'après Yohe et Wallace (1996).

- En première approche, le scénario *j* est fixé, l'incertitude ne porte que sur le plafond final *k*. La première ligne du Tableau 4.5 montre, pour chaque scénario, quelle cible initiale *i=i**(*j*) minimise l'espérance des coûts. Il apparaît que commencer par viser 850ppm constitue le meilleur choix dans 5 scenarii sur 7, dans les deux suivants il vaut mieux viser 800 et 700 ppm.
- Ensuite, les auteurs examinent ensuite le cas où le scénario est incertain jusqu'en 2020. Pour cela, ils supposent une politique initiale optimale par rapport au scénario *j* , c'est à dire que c'est celle qui minimise les coûts d'atteindre *i**(*j*). Ils examinent ensuite l'espérance du coût de cette politique initiale en tenant compte de la double révision sur le scénario et le plafond en 2020 avec deux hypothèses de probabilités pour les scénarios. La quatrième ligne du Tableau 4.5 utilise les probabilités dérivées de la méthode de Monte Carlo, et la cinquième suppose l'équidistribution. Il apparaît que les scénario les plus favorables sont le 1 et le 2 ou le 3 dans le second cas.

En commentaire, nous pourrions nous interroger sur la signification de l'importance accordée par les auteurs à ce second résultat. En effet, contrairement au plafond de concentration qui est une variable de décision, l'état du monde est un paramètre extérieur. Il n'est guère surprenant de trouver que l'état du monde 1 est plus favorable que le 7 puisqu'ils sont définis ainsi. Nous ne voyons donc pas les conséquences pratiques de ce résultat sur l'incertitude des scénarios.

Bien que les auteurs qualifient leur résultat de remarquablement robuste, nous remarquerons néanmoins que à scénario fixé, le surcoût à viser 550ppm au lieu de 850ppm est négligeable devant les différences entre les scénarios, comme le montre les seconde et troisième lignes du Tableau 4.5.

Finalement, nous remarquerons que faire commencer l'éventail de seuils de stabilisation de la concentration de CO_2 au niveau de 550 ppm est une hypothèse forte. Compte tenu des autres gaz à effet de serre, le forçage radiatif à ce niveau de concentration est largement supérieur au forçage correspondant à un doublement de la concentration de CO_2 . A ce stade, une augmentation de température moyenne de 2.5°C correspond à une estimation basse.

2.4. MERGE - Manne, Richels et Mendelsohn

Nous quittons maintenant les modèles inspirés de DICE pour examiner les travaux de Manne et Richels[42]. Ces auteurs ont aussi eu une grande influence sur les débats. En ce qui concerne l'analyse de la décision séquentielle, ils ont notamment introduit[43] la distinction entre les problèmes de décision caractérisés par 'act then learn' (ATL) et les problèmes 'learn then act' (LTA).

- Les modèles décrivant les situations de décision de type LTA sont déterministes, en ce sens qu'ils supposent que les intéressés peuvent acquérir les informations nécessaires sur l'état du monde *avant* d'agir. Ce cadre conceptuel ne correspond pas à la réalité du problème du changement climatique.

- En effet, il s'agit en réalité de prendre une suite de décision échelonnées dans le temps offrant la possibilité d'agir avec prudence, de tirer des enseignements au fur et à mesure et de procéder à des ajustements à mi course. Dans le modèle Global 2100, avant 2010 les choix concernant l'offre et la demande dans le secteur énergétique doivent être effectués alors que l'instauration de mesures visant le carbone est entachée d'incertitude. Au delà de 2010, les décisions sont prises *après* élimination de l'incertitude. Il s'agit en cela d'une caractérisation ATL de la situation.

Nous nous concentrerons sur les résultats, les caractéristiques principales du modèle et de ses raffinements successifs étant exposées Encadré 4.2.

Concernant l'effet de l'incertitude, les auteurs délivrent un message de précaution que nous diviserons en deux parties. *Primo*, la simple menace d'instauration d'une mesure visant le carbone suffit pour ralentir l'augmentation des émissions. *Secundo*, les méthodes déterministes risquent d'aboutir à une surestimation des quantités émises, l'incertitude réduit les émissions optimales.

Comparer la stratégie optimale en situation ATL avec le scénario de référence permet de conclure quand à la première partie du résultat. Toutefois, pour étayer la seconde, il nous semble qu'il manque un élément théorique central, l'équivalent certain. Nous n'avons pas trouvé chez Manne et Richels de comparaison entre la stratégie optimale ATL avec la stratégie optimale en équivalent certain. Pour rester dans la typologie développée par les auteurs, l'équivalent certain correspond aux situations 'never learn', qui n'ont été introduites que plus tard par d'autres auteurs[45]. Celles ci sont caractérisées par le fait que les paramètres incertains restent toujours égaux à leur valeur espérée, l'incertitude n'est jamais résolue.

Conclure ici donnerait une image très inexacte de l'intérêt de MERGE, qui va bien au delà de l'introduction de la décision séquentielle. Comme le modèle est intertemporel et régionalisé, il permet d'étudier la flexibilité de lieu et de temps. Les auteurs ont notamment introduit[46] la notion de souplesse temporelle et spatiale ("when and where flexibility" en anglais). La souplesse spatiale

« Buying Greenhouse Insurance » Chapter 7 describes the **Global 2100** model for determining the costs of adapting to one or another limit on carbon emissions. The model provides for two-way linkage between a top-down model of economic growth and energy demands (MACRO) and a bottom-up model for energy technology assessment (ETA). A Ramsey model is employed for the determination of savings and investment through a discounted utility maximand. Energy-economy interactions, price-induced energy conservation and interfuel substitution are handled through a nested CES (constant-elasticity of substitution) production function. The model also allows for autonomous energy efficiency improvements (AEEI, for short). In Global 2100, the world is disaggregated into five geopolitical regions, and parallel analyses are conducted for each region independently. An informal decomposition procedure is employed for interregional trade in oil and in carbon emission rights.

Global 2100 was a cost-effectiveness analysis, but **MERGE** is an integrated assessment in which the costs of abatement are explicitly balanced off against the benefits of reducing the impacts of climate change. In this first version of MERGE, there is one-way linkage from ETA-MACRO to the CLIMATE and IMPACT submodels. MERGE accounts for market damages (through production losses) and nonmarket damages (through losses in utility).

MERGE 2 provides for two-way linkage between ETA-MACRO and the CLIMATE and IMPACT submodels. It includes an application of decision analysis, and it contrasts the "learn, then act" versus "act, then learn" approach.

Distinctive features of **MERGE 3**: 9 geopolitical regions. The marginal productivity of capital declines over time so as to approximate a case in which there is declining GDP growth, but a constant utility discount rate. Revised the benchmarking procedure so as to eliminate the "rebound" effect associated with the autonomous energy efficiency improvement factors. This revision significantly reduces the total primary energy consumption and also the global carbon emissions associated with the basecase (reference) scenario. Includes a revised formulation of the energy technology expansion and decline limits. Allows for endogenous technological diffusion in the case of the electrical technologies ADV-HC and ADV-LC. Benders decomposition as the solution technique.

Encadré 4.2 : De Global 2100 à MERGE 3.

Source : A. S. Manne[44].

signifie que par la coopération internationale, les pays de l'OCDE peuvent exploiter les possibilités de réduction à bas coût ailleurs dans le monde. Cette possibilité existe dans la pratique par les programmes d'implémentation jointe. La souplesse temporelle signifie que l'on peut compenser des émissions relativement plus élevées court terme par des émissions plus basses à long terme.

Comme le montre la Figure 4.4, la flexibilité spatiale permet de réduire les coûts de plus que la moitié. La flexibilité temporelle, qui revient à reporter les réductions dans le futur, permet de réduire encore de 50% le coût global. De plus, l'analyse suggère que les pays non OCDE pourraient trouver un avantage à la flexibilité, dans la mesure où le négoce de permis d'émissions pourrait plus que compenser la déprime de la demande de pétrole.

En plus d'avoir permis d'introduire de nombreux concepts autour desquels les débats se sont structurés, MERGE a aussi permis de calibrer des modèles très voisins comme CETA[47], qui a permis de montrer que le degré de non linéarité de la fonction de dommage est l'incertitude clé concernant le choix de la politique optimale à court terme. Ce résultat rappelle l'importance de la discussion sur la forme de la courbe de dommage marginal.

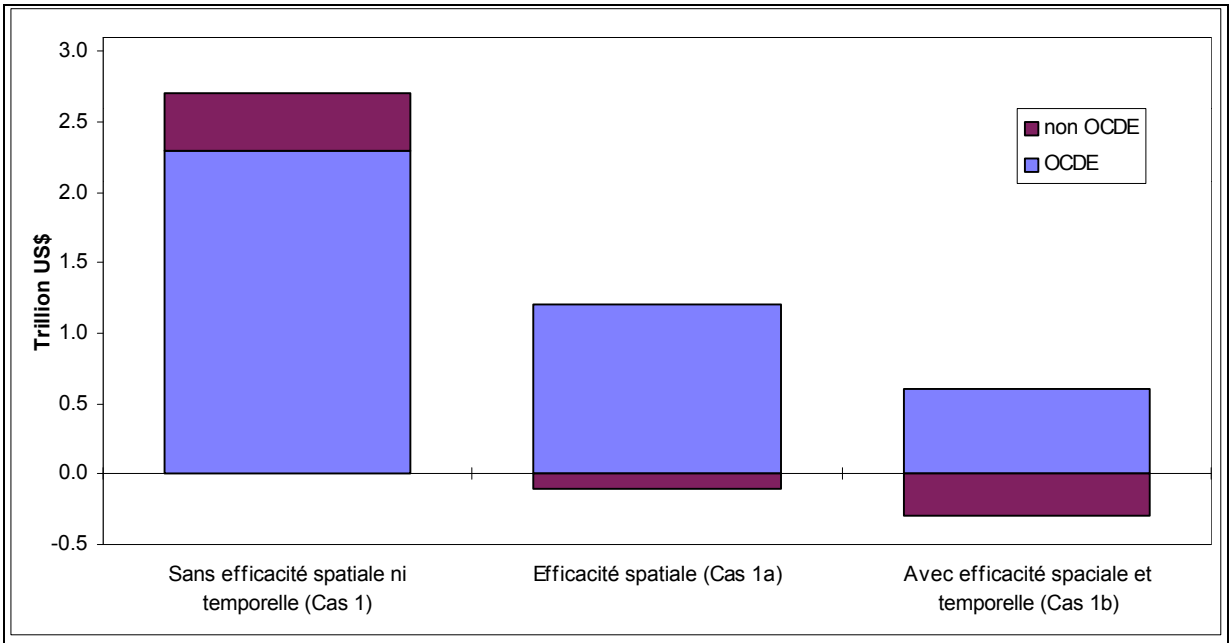


Figure 4.4 : When and where flexibility.

Coût de réduire de 20% les émissions dans les pays de l'OCDE, dans trois alternatives. Résultats du modèle MERGE, d'après Manne and Richels, 1996 (Energy Policy).

Cas 1 (sans efficacité spatiale ou intertemporelle), chaque région doit réduire ses émissions indépendamment. Cas 1a (avec efficacité spatiale), Le négocie de droits d'émission est permis, ce qui assure que les réductions se font là où elles coûtent le moins cher. Dans l'allocation initiale des droits, les régions non-OCDE reçoivent l'intégralité de ce qu'elles émettent dans le cas 1. Cas 1b (avec efficacité spatiale et temporelle), la contrainte n'est pas placée sur le niveau d'émission à chaque date, mais sur le niveau de concentration. Ce niveau est fixé afin de retrouver la concentration du cas 1 en 2050. Coût actualisé à 5% jusqu'à 2100.

3. Modèles de simulation et de viabilité

3.1. CRPS - Hammit et alii.

Hammitt, Lempert et Schlesinger[48] utilisent un modèle de simulation récursive, CRPS, qui représente la production d'énergie au moyen de générations de capital. Deux sortes de capital sont envisagées, le 'polluant classique' et le 'non polluant'. Le taux de pénétration du capital non polluant dans le capital total est identifié au taux de réduction des émissions. Par hypothèse, ce taux est supposé suivre une loi logistique caractérisée par la date de début de pénétration t_0 et la durée r après laquelle la moitié du capital en opération est non polluant.

CRPS permet d'étudier de façon transparente quelle date t_0 et quelle vitesse r de pénétration du capital non polluant seraient nécessaire pour de respecter une contrainte de température ΔT^* imposée compte tenu du paramètre de sensibilité climatique au forçage radiatif ΔT_{2x}, et quel est le coût de réduction C associé. Nous examinerons successivement trois résultats.

- Il est clair que le coût croit avec le paramètre de sensibilité ΔT_{2x} et décroît avec le plafond de température ΔT^*. Le modèle permet de quantifier ces intuitions, et de montrer que ces variations sont importantes. Prenons par exemple une référence dans laquelle la sensibilité climatique à un doublement du forçage radiatif est de 1.5°C et le plafond maximum d'augmentation de la température 1,7°C . Dans l'hypothèse où l'on voudrait atteindre seulement 0,9°C d'augmentation de température maximale, le coût serait décuplé, atteignant les 10^{12} $ en valeur annuelle actualisée à 5%. Ce coût serait aussi atteint dans la variante où ΔT_{2x} atteindrait l'autre borne des estimations du GIEC, 4,5°C.
- Examinant ensuite la sensibilité du coût à t_0 , la date de début de pénétration du capital non polluant, les auteurs comparent le coût C de deux stratégies différentes à court terme : une stratégie de réduction modérée définie par $t_0 = 2012$, et une stratégie agressive définie par $t_0 = 2002$. Le résultat, intuitif, est que la stratégie agressive est la moins coûteuse lorsque l'on se fixe un plafond de température strict devant la sensibilité climatique, et vice versa. Le modèle confirme l'intuition et permet de calculer les couples (ΔT^*, ΔT_{2x}) pour lesquels les deux stratégies sont identiques en coût (Tableau 4.6).

En examinant les résultats de plus près (figure non reproduite ici), il apparaît que la différence relative de coût total de réduction entre les deux stratégies reste assez faible, inférieure à 10%. La sensibilité de C à t_0 apparaît faible, devant la sensibilité au couple (ΔT^*, ΔT_{2x}). Ce résultat suggère que la question de *la date* à laquelle il convient d'introduire les formes énergies non polluantes est moins cruciale que celle de *la vitesse* de diffusion examinée ci-après.

Sensibilité de la température à un doublement du forçage radiatif: ΔT_{2x} en °C	0,5	1,5	2,5	4,5
Niveau du plafond de température ΔT^* au dessus duquel la stratégie modérée est plus économique, en °C.	0,9	1,5	2,1	2,9

Tableau 4.6 : CRPS, Meilleure stratégie à court terme.

Choix d'une stratégie à court terme en fonction des caractéristiques climatiques. D'après Hammit et al. (1992)

	Stratégie agressive : commencer dès maintenant	Stratégie modérée : commencer dans 10 ans
$\Delta T^* = 3$ °C	108 ans	80 ans
$\Delta T^* = 1.5$ °C	27 ans	20 ans

Tableau 4.7 : CRPS, Durées de pénétration du capital non polluant.

Durée de pénétration à 50% du capital non polluant nécessaire pour atteindre un plafond de concentration ΔT^* donné en fonction de la stratégie à court terme. La sensibilité climatique est $\Delta T_{2x} = 2.5$ °C. On voit sur le tableau que si le plafond de température est élevé relativement à ΔT_{2x} (première ligne), alors attendre dix ans avant de commencer à construire le capital non polluant n'accélère que modérément la vitesse de réduction en seconde période, de 108 à 80 ans. Par contre, si le plafond de température est bas (deuxième ligne), attendre a un effet sensible. D'après Hammitt et al. (1992).

- Les résultats du Tableau 4.7 concernant la durée de demi pénétration r du capital non polluant suggèrent que, pour un plafond de +1.5°C dans le cas central de sensibilité, même la stratégie agressive est difficile à mettre en place, puisqu'elle correspond à $r = 27$ ans. La conclusion principale des auteurs est donc que la tache la plus importante à court terme n'est pas de réduire les émissions, mais d'améliorer les conditions de diffusion des technologies non polluantes.

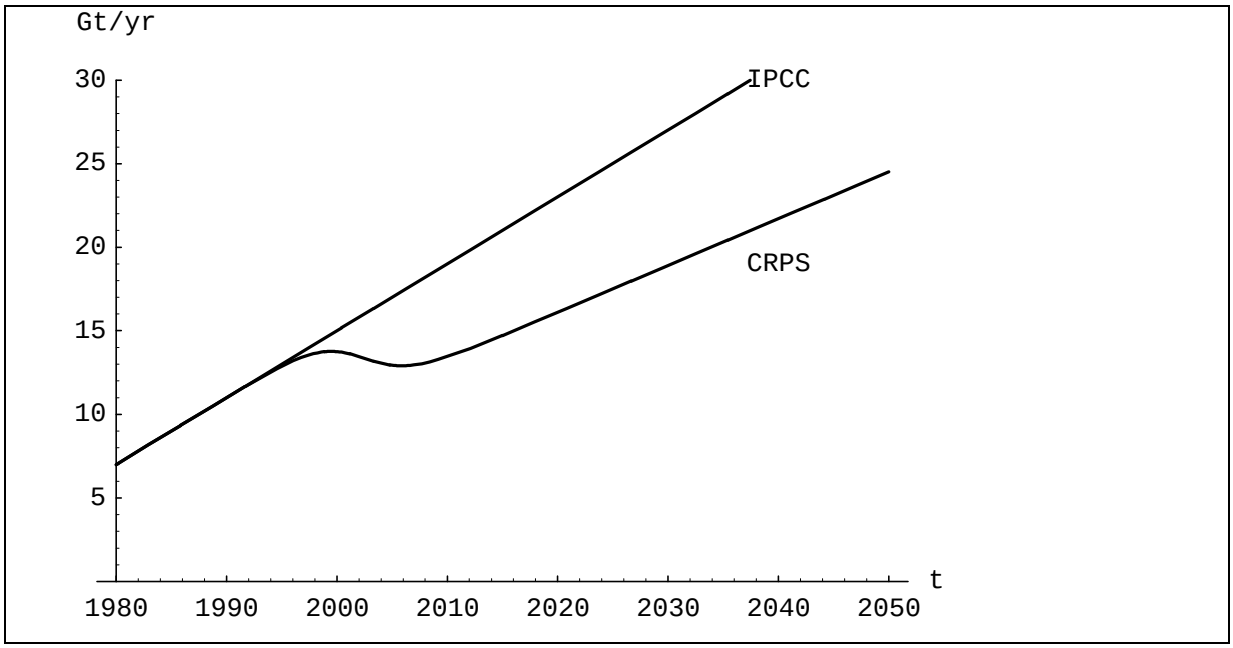
Toutefois, cette conclusion est dans une certaine mesure trivialisée compte tenu de la trajectoire de référence utilisée dans CRPS. Cette référence, représentée Figure 4.5 page 119, provient du fait que les auteurs supposent l'existence d'un 'sans regret' important, c'est à dire que 30% de réductions par « économies d'énergie » sont réalisés à coût nul en 20 ans. Ce problème permet de souligner l'importance d'une meilleure compréhension des relations réciproques entre réduction des émissions, progrès technique et baisse des coûts de réduction.

Au final, CRPS est peut être le premier modèle a avoir explicité si clairement l'opposition possible entre une contrainte climatique stricte et la vitesse de pénétration du capital.

3.2. IMAGE 2 - Alcamo et Krol

Figure 4.5 : Profils d'émission de référence dans CRPS.

Flux annuels de gaz à effet de serre d'après Hammit et al. (1992). Dans la référence de CRPS, les émissions sont brutalement réduites en 1992, elles sont stabilisées en 2010 en dessous du niveau de 1995, et elles reprennent à partir de 2020 une trajectoire croissante comme dans la référence IPCC IS92a.



Le modèle IMAGE[49], actuellement dans sa version 2 s'inscrit dans une tradition de modélisation intégrée remontant aux travaux du Club de Rome. Alors que DICE pourrait représenter le pionnier des modèles d'optimisation, IMAGE pourrait être vu comme sont correspondant du côté des modèles de simulation récursive. Il est composé de trois sous systèmes : Energie/Industrie, Environnement terrestre et Atmosphère/Océan. Chaque sous système est décrit par quatre ou cinq modèles couplés, comme l'indique la Figure 4.6. Le sous système Energie/Industrie comprend 13 régions géopolitiques du monde, et les deux modules environnementaux sont encore bien plus détaillés géographiquement.

Le modèle a été exploité interactivement avec des décideurs au cours de trois ateliers organisés en 1995, le 'processus de Delft Delft ('. Ces ateliers avaient pour but de déterminer comment le modèle pourrait aider pour les négociations du Mandat de Berlin. Organisés avec l'aide de la Commission Européenne, ils réunissaient à l'Université de Delft des conseillers politiques provenant d'une dizaine de pays. Ces ateliers ont aboutit au concept des "Couloir de sécurité des émissions", appelé 'Safe emissions corridor émissions:S'.

Si les émissions mondiales sont trop élevées en 2010, il y aura peu de chances de corriger la trajectoire après coup pour éviter les impacts du changement climatique. Mais d'un autre côté, les émissions en 2010 ne peuvent pas être trop basses car cela impliquerait des taux de réduction irréalisables économiquement et technologiquement. Entre ces deux extrêmes se trouve un couloir de sécurité des émissions, intervalle dans lequel le niveau des émissions est compatible avec des objectifs spécifiques à court et à long terme.

La procédure de calcul des couloirs de sécurité revient à circonscrire progressivement un ensemble de trajectoires à l'aide de critères de plus en plus restrictifs. On peut décrire la procédure en trois temps.

- Tout d'abord, un ensemble comprenant un grand nombre de scénarios d'émissions est défini *a priori* . Le modèle IMAGE évalue ces scénarios, afin de définir une maquette numérique simple approximant le modèle comme une boite noire. Plus précisément, les résultats sont utilisés pour définir statistiquement trois relations simples reliant les indicateurs du changement climatique aux émissions. L'élévation du niveau de la mer et le changement de température dépendent linéairement des émissions cumulées. La variation de température à une décennie dépend de la

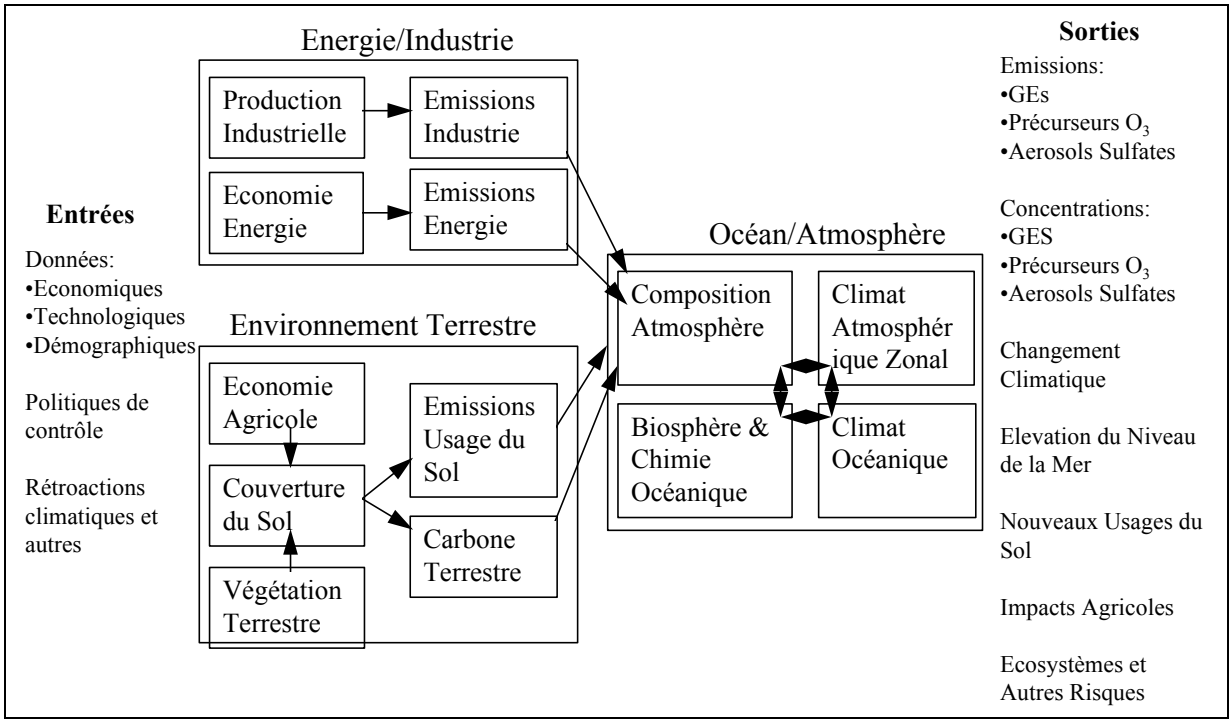


Figure 4.6 : IMAGE 2, Diagramme schématique.

D'après Alcamo et al. (1996).

somme des émissions aux deux décennies précédentes.

- Puis l'ensemble des scénarios d'émission est restreint une première fois en fonction de critères 'raisonnables', mais indépendamment des objectifs d'environnement. En particulier, une contrainte sur la différence seconde des d'émissions est posée, afin que le taux de variation des émissions ne change pas de plus de 2% d'une période sur l'autre : $\Delta E_{t+1} \in [\Delta E_t - 2\% , \Delta E_t + 2\%]$. Cette contrainte est importante, comme nous allons le constater plus bas avec le modèle ICLIPS (page 121).
- Enfin, l'ensemble est restreint à nouveau, en fonction des objectifs d'environnement et par l'intermédiaire des lois statistiques calculés précédemment. Les scénarios qui restent constituent le corridor de sécurité.

Trois corridors sont décrits Tableau 4.8. Si l'on suppose que les pays non signataires de l'Annexe I émettrons de l'ordre de 6.3 GtC en 2010, alors les résultats montrent que pour atteindre le haut du couloir B, les émissions des pays de l'Annexe I doivent être stabilisées en 2010 au niveau de 1990. Pour atteindre le milieu du corridor A (et a fortiori des autres corridors), les émissions en 2010 doivent être nettement inférieures au niveau de 1990.

IMAGE 2 permet aussi de s'intéresser à la flexibilité, en recalculant le couloir de sécurité des émissions à partir de 2010. Plus les émissions sont basses en 2010, plus ce couloir est large. Quand le cas où le dessus du corridor est atteint en 2010, le couloir totalement aplati. Dans ce cas, les générations futures n'ont plus aucune flexibilité et doivent réduire les émissions globales au rythme maximal.

On pourrait être surpris par une disproportion entre un modèle sophistiqué comme IMAGE et l'analyse des couloirs qui repose sur une maquette simple. En effet, d'autres auteurs comme Enting[50] obtiennent bien plus rapidement des résultats de même nature. Il importe donc de noter que l'analyse ne s'arrête pas là. En interaction avec les décideurs, le modèle complet peut être utilisé ensuite pour présenter en détail les conséquences possibles d'une trajectoire d'émission donnée choisie dans un couloir de sécurité donné.

3.3. ICLIPS - Toth et alii.

Le projet ICLIPS[51], se propose d'éclairer le problème du changement climatique en utilisant la théorie de la viabilité, dans le but de dépasser les limitations de l'approche coût-bénéfice traditionnelle. En effet, il apparaît que dans les pays développés, la majeure partie des dommages climatiques sera hors des comptes nationaux et qu'il ne semble pas possible de convertir de façon crédible les dommages non monétaires en unités comptables.

La méthode, baptisée « A Tolerable Window Approach », se distingue notamment des « Safe

Scénario	A	B	C	
Limite du changement de température	2	1.5	1	°C
Limite de la variation de température	0.20	0.15	0.10	°C / décennie
Limite de l'élévation du niveau de la mer	40	30	20	cm
Limite du taux de réduction des émissions	4	3	2	% / an
Emissions équivalent CO_2 permises en 2010	7.3 - 14.5	7.3 - 12.5	7.6 - 9.3	GtC / an
Emissions maximales Annexe I	8.2	6.2	3.0	GtC ± 0.75
Variation maximale Annexe I par rapport à 1990	141%	107%	52%	

Tableau 4.8 : IMAGE 2, Couloir de sécurité des émission en 2010.

** La limite de variation de température peut toutefois être dépassée pendant 2 décennies.*

D'après Alcamo et Kreileman (1996), p. 326.

Corridors » du modèle IMAGE. En effet, si dans les deux cas il s'agit de calculer un ensemble de trajectoires possibles satisfaisant un jeu de contraintes donné, la procédure de contrôle scientifique des résultats est très différente. L'algorithme de résolution utilisé pour les « safe corridors » est essentiellement pratique : on génère un grand nombre de trajectoires, puis on rejette toutes celles qui ne conviennent pas. Au contraire, les fenêtres tolérables sont calculées d'abord par des démonstrations mathématiques rigoureuses, à l'issue desquelles des algorithmes numériques sont mis en oeuvre pour approcher l'ensemble des solutions.

En juillet 1997, le modèle que nous avons pu examiner était encore en développement, mais plusieurs résultats intéressants apparaissaient déjà. Nous en discuterons deux.

- L'allure générale des fenêtres apparaît telle que nous l'avons représentée Figure 4.7. Elles permettent de montrer quelle est la date la plus tardive à laquelle il faut quitter la trajectoire de référence pour respecter les contraintes.

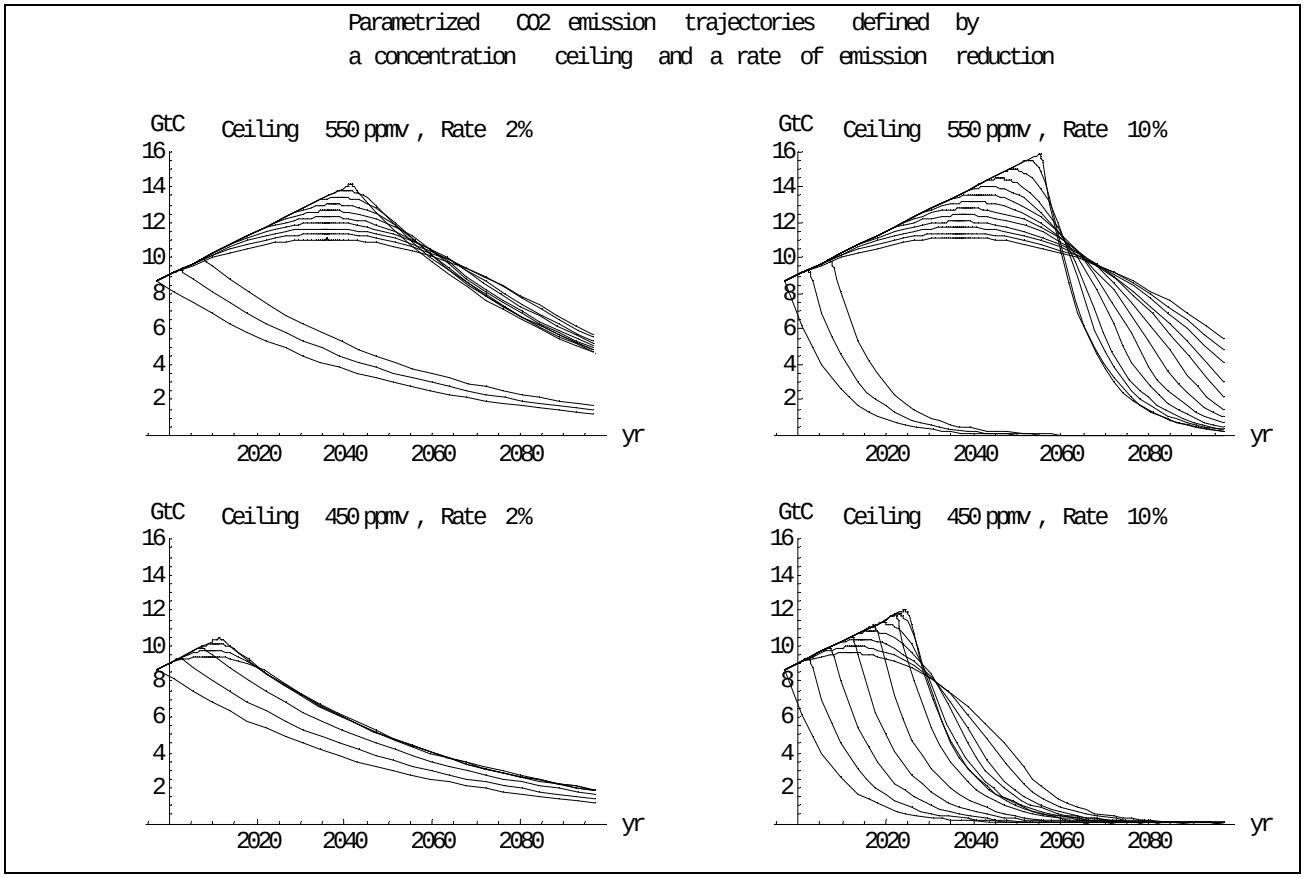


Figure 4.7 : Allure des fenêtres tolérables d'émissions de CO_2.

La fenêtre tolérable d'émissions est la zone comprise entre l'enveloppe supérieure et la courbe inférieure. La figure ne représente que certaines trajectoires d'émissions dans cette fenêtre. Le plafond de concentration est 550 ppmv pour les deux d'en haut et 450ppmv en bas Le taux maximal de réduction des émissions est 2%/an à gauche, 10%/an à droite. Calculs indépendants de l'auteur reproduisant qualitativement les résultats d'ICLIPS.

- Les résultats préliminaires d'ICLIPS permettent de montrer, et de discuter comment, quand et pourquoi, des contraintes de nature socio-économique aboutissent parfois la même fenêtre tolérable que celle définie par un simple plafond sur la température par exemple.

Le second résultat porte sur un point jusqu'à présent peu discuté par les analystes à propos de l'objectif de la Convention Climat. Dans les modèles, comme dans le texte de la Convention Climat, les contraintes imposées portent en général sur les grandeurs géophysiques. Par exemple; en se basant sur l'histoire géologique, on a pu se fixer des limites concernant le niveau et le rythme de la variation température globale et du niveau moyen des mers. Mais d'un point de vue finaliste, il apparaît clairement que les contraintes concernant les impacts du changement climatique en terme de concrets, les subsistances alimentaires par exemple, sont plus pertinentes. Bien que la prise en compte des aspects socio-économiques dans ICLIPS ne soit pas encore achevée, il apparaît donc que ce modèle apporte un élément intéressant et nouveau concernant les impacts.

Toutefois, sur le plan des coûts de réduction des émissions, les auteurs gardent pour l'instant ouvertes plusieurs options. Il serait par exemple possible de poser également des contraintes sur les coûts ou, alternativement, de minimiser les coûts de réduction en prenant la fenêtre tolérable comme contrainte.

Jusqu'à ce que ces aspects soient intégrés, on peut se demander dans quelle mesure le 'pic' des fenêtres tolérables est un artefact de modélisation ou bien si il correspond à une opportunité réelle de retarder les émissions. Si la seconde explication se révélait la bonne, les implications politiques à court terme seraient importantes. Mais nous pensons plutôt que le pic provient du manque de prise en compte de l'inertie économique ne les résultats actuels. En effet, la fenêtre tolérable contient des trajectoires d'émissions qui passent *en 1 an* de la croissance linéaire (la trajectoire de référence, discutée par exemple dans DIAM au chapitre 5) à une diminution exponentielle. De plus, le taux maximal possible de réduction des émissions mondiales est fixé à 10% par an. Ces deux paramètres peuvent sembler extraordinairement élevés par rapport aux dynamiques passées du système énergétique présentées chapitre 3.

Cette non prise en compte de l'inertie risque alors de brouiller le message transmis par le modèle. A la limite, les résultats pourraient être exploités par l'absurde, ils font apparaître clairement à quel point, si l'on suit la trajectoire de référence pendant deux décennies, supposer que l'on pourra encore satisfaire des contraintes environnementales fortes est osé.

Les impacts sont représentés dans ICLIPS par des fonctions réduites résumant les résultats de modèles spécialisés plus détaillés. De même, le cycle du carbone simplifié est une dynamique du premier ordre en fonction des émissions courantes, cumulées et de la concentration passée. La trajectoire d'émission est paramétrisée en trois morceaux raccordés C^1 . Le premier morceau est une croissance linéaire représentant la trajectoire de référence sans changement, le morceau de transition est parabolique, et le dernier morceau est une décroissance exponentielle. Malgré toutes ces simplifications, la quantité de calculs nécessaire pour résoudre le modèle est importante. Le code actuel en C n'est pas optimisé, mais il faut compter plusieurs minutes de supercalculateur pour résoudre le modèle sur 50 années, en prenant un point par année.

Encadré 4.3 : Éléments de structure d'ICLIPS.

3.4. Autres modèles

Notre revue serait pas un panorama complet de la littérature si nous n'évoquions pas les modèles de simulation stochastique. De tels modèles, comme PAGE[52, 53, 54, 55] par exemple, permettent d'évaluer et de comparer les politiques, et en cela ils peuvent se comparer à d'autres modèles de simulation, comme IMAGE par exemple. La différence essentielle est que dans PAGE, les paramètres sont presque tous caractérisés par une distribution de probabilité, propagée dans les calculs, ce qui permet au final d'obtenir non seulement les valeurs espérées, mais aussi les valeurs extrêmes des résultats.

La simulation stochastique permet formaliser les questions qui surgissent en comparant les fourchettes d'incertitudes du GIEC concernant les conséquences d'un doublement de la concentration de CO_2 . En effet, le groupe I estime le réchauffement possible à 1.5 - 4.5 degrés, alors que le groupe III estime le dommage possible à 1.5 - 2 pour-cent du produit mondial brut. Ces questions sont fondamentales, puisqu'il s'agit de rapprocher des incertitudes de nature différente. Mais la perspective est très différente de celle offerte par les modèles d'optimisation stochastique, et ne rend pas compte, jusqu'à présent du moins, des notions de stratégie séquentielle et de résolution au cours du temps de l'incertitude. C'est pourquoi nous n'y consacrerons pas davantage d'espace ici.

Si, il y a cinq ans, il aurait peut être été possible d'examiner et de décrire la totalité des modèles existants, aujourd'hui l'exhaustivité exigerait un volume plus important que celui disponible ici. De même, si rendre suffisamment justice à l'importance des travaux n'a pas été possible, c'est peut être que nous avons trop voulu les examiner par rapport à la question de l'irréversibilité qui nous préoccupe, alors que ce n'était pas la question première à laquelle ils se rapportaient. De plus, tout cela n'offrirait pas nécessairement un grand intérêt supplémentaire, surtout par rapport au travail déjà effectué ailleurs[56].

La revue n'est pas exhaustive, mais elle est néanmoins substantielle. Sur les 22 modèles intégrés analysés par le GIEC[57] en juin 1995, nous venons d'en examiner huit en comptant les travaux de l'IIASA évoqués au chapitre précédent, et qu'un neuvième est décrit dans cette thèse, DIAM. Et l'échantillon choisi est représentatif de la grande variété de modèles que nous avons discutée en introduction.

Parmi les travaux plus récents, nous avons examiné ICLIPS, et nous voudrions également aborder ceux de Ulph et Ulph[58], qui abordent directement les questions étudiées dans cette thèse. Ces auteurs proposent à la fois une analyse théorique et empirique de la valeur de quasi option dans le problème du changement global. Dans la vaste majorité des jeux de paramètres qu'ils étudient, leurs résultats numériques supportent le contraire de l'effet d'irréversibilité : une meilleure information future tend à augmenter les émissions optimales à court terme. Or, ce modèle nous permet de résumer ce que nous avons voulu faire apparaître jusqu'ici :

- La fonction de dommages climatiques, proportionnels au cube du réchauffement, ne reflète pas fidèlement le problème des surprises et des non linéarités.
- Les coûts d'ajustements sont sous estimés. Le coût de réduction à chaque instant est proportionnel au carré de celle ci, et la contrainte d'irréversibilité est caricaturalement capturée en excluant les émissions négatives.

Nous allons maintenant examiner de façon plus transversale un troisième point, celui que nous avons identifié au chapitre précédent comme constituant un encore défi pour les modèles intégrés, à savoir la représentation réaliste et crédible du progrès technique.

4. Progrès technique et évaluation intégrée

Après une exposition des caractéristiques positivement intégrées dans les modèles, voyons maintenant un des aspects restant à inclure dans les évaluations : le progrès technique.

Bien que vraisemblablement promise à un bel avenir[59], la science de la modélisation intégrée de l'environnement est encore jeune. Alors que dès la découverte de la thermodynamique, les savants ont

modélisé la physiques des fluides entourant la planète, les grands problèmes écologiques ne surgissent qu'après la seconde guerre mondiale. Il n'y a donc pas de surprise à constater de grands trous dans la couverture du sujet. Le progrès technique n'est que l'un d'eux, et les deux chapitres précédent[60] permettent sans doute de comprendre son importance.

Ce paragraphe est organisé en trois sections. Nous exposons d'abord la réalité du changement technique induit, que nous opposons ensuite avec le traitement exogène du progrès technique dans les modèles, avant de terminer sur les implications politiques de ce problème.

4.1. Le changement technique induit, source d'adaptabilité à long terme

Pour montrer dans quelle mesure les développements dans la technologie et dans l'organisation des systèmes énergétiques reflète les contraintes du marché et les pressions externes, nous exposerons trois exemples spécifiques, à différents niveaux d'agrégation.

⇒ *Progrès technique dans l'extraction du pétrole en mer*

Lorsque les compagnies pétrolières ont commencé à opérer dans les eaux plus profondes de la mer du Nord, elles se fondaient sur des projections décrivant le prix du pétrole atteignant 50 dollars par baril ou plus. Au début des années 1980, on estimait que le coût du pétrole produit par les nouvelles plate formes en eaux profondes serait autour de 25 dollars par baril. A la chute du cours, les entreprises ont répondu par des efforts de compression des dépenses, conduisant à des innovations radicales sur la conception des plates formes et la gestion du projet. Aujourd'hui, les champs en eau profonde sont toujours développés par des firmes qui croient que le prix du baril ne dépassera pas 20$ pendant de nombreuses années encore, avec des coûts de production de l'ordre de 10$ par baril.

Ces développements ont demandé des efforts importants et des investissements poursuivis dans de nouvelles techniques. Ils n'auraient certainement pas été aussi intenses en l'absence de réactivité des firmes aux chocs sur les prix.

⇒ *Persistance d'un potentiel d'amélioration dans le secteur énergétique*

Le second exemple concerne l'existence d'opportunités d'investissements rentables améliorant l'efficacité énergétique. En 1980, le Departement of Energy du Royaume Uni effectua une évaluation des opportunités d'amélioration de l'efficacité énergétique dans l'industrie nationale. Ils conclurent que l'intensité énergétique dans l'industrie pouvait être réduite d'environ 20% au cours des 20 prochaines années par des investissements rentables. En 1990, une nouvelle évaluation conclut que la plupart du potentiel identifié avait déjà été exploité, mais que, malgré des prix de l'énergie inférieurs, on pouvait identifier des investissements rentables réduisant l'intensité énergétique d'encore presque 20%. Une caractéristique curieuse et récurrente des études sur l'efficacité énergétique est d'identifier un potentiel d'amélioration rentable de l'ordre de 20-30% de la demande courante, et cela presque indépendamment du potentiel déjà exploité.

Cela s'explique par l'existence d'un processus incessant de développement de nouvelles opportunités. Il semble difficile de faire la part de celles qui proviennent des changements dans les prix de l'énergie et de celles qui sont induites par les investissements plus importants dans les techniques économes en énergie. Mais la persistance d'un tel potentiel d'amélioration suggère que les investissements effectués améliorant l'efficacité énergétique ne sont pas un facteur limitant, et qu'au contraire l'innovation recrée en permanence des gisements d'efficacité énergétique.

⇒ *Effets d'hystérésis des chocs sur les prix de l'énergie*

Le troisième exemple est l'hystérésis de la réponse macro-économique au choc sur les prix de l'énergie. En terme réels, les prix de l'énergie dans certains secteurs et certains pays sont en dessous de leur niveau de 1972. Les modèles économétriques traditionnels construits autour d'une élasticité-prix constante supposent que la réponse à l'augmentation ou à la baisse des prix est symétrique. Après une

nette baisse de tendance dans la consommation d'énergie, surtout hors de l'industrie lourde, aurait dû succéder une hausse équivalente (après prise en compte de la tendance autonome).

En fait, si la tendance de la demande est effectivement repartie à la hausse dans la plupart des pays et des secteurs, le retournement est loin d'avoir l'ampleur d'un rattrapage. La baisse de la consommation suivant une augmentation des prix est nettement plus sensible que la hausse de la consommation qui suit une diminution des prix. Gately[61] en cherchant à quantifier l'irréversibilité-prix de la demande mondiale de pétrole, conclut que :

> *"La réponse aux baisses de prix des années 1980 est peut être seulement un cinquième de celle des hausses de prix des années 1970."*

Les économistes de l'énergie ont donc commencé à discuter du besoin d'inclure des élasticités asymétriques pour modéliser le comportement observé. Dargay[62], cite, en plus des siennes, pas moins de neuf études visant à explorer le problème de l'irréversibilité ou de l'asymétrie dans la demande d'énergie, et conclut :

> *"challenging two of the common assumptions made .. that a return to low energy prices .. would eventually restore demand to what it would have been had prices never risen .. not only does this not seems to be happening, but it also appears highly irrealistic. It is obvious that high energy prices induced the development and application of considerably more energy-efficient technologies in all sector of the economy, many of which will remain economically optimal despite falling prices."*

⇒ *Progrès induit et adaptabilité à long terme*

A trois niveaux différents, que l'on considère une filière, un secteur, ou toute l'économie, on trouve des exemples montrant que le développement de l'efficacité énergétique n'est pas autonome, mais induit par les pressions extérieures et politiques.

Il est frappant de constater que, malgré des économies relativement ouvertes et un fonds technologique commun, le Japon, l'Europe et les Etats Unis ont des systèmes énergétiques si différents. La consommation d'énergie par habitant est deux fois plus élevée aux Etats Unis qu'en Europe ou au Japon. Les consommateurs européens et japonais ne se sentent pas rationnés, cette situation est normale pour eux. . Ces éléments donnent à penser que le progrès induit peut s'élargir à la notion d'adaptabilité à long terme de l'économie : l'évolution peut aboutir à des situations de haute efficacité énergétique sans que la société le ressente négativement par rapport à une situation de moindre efficacité.

4.2. La représentation du progrès technique dans les modèles

En examinant la représentation du progrès technique dans les modèles, Weyant[63] écrit :

> *"Almost everyone, researchers and Policy makers alike, agrees that the response of Technology to economic incentives over the coming decade may be crucially important in the design of appropriate energy and environmental policies.*
>
> *The current generation of energy-environmental models, however, generally take technological change as an exogenous input, making the analysis of Policy options incomplete. Although this approach certainly leads to inaccuracies and inconsistencies in projecting the state of the energy/environment system many decades in the future, its implications for the evaluation of current Policy options are less clear. A pragmatic focus on current decision rather than long term projections may lead to less concern about precise measurement of the processes by which technologies are developed and introduced in the economy. However, insight from research on the process of technological innovation and diffusion may have significant implications for current Policy decisions"*

Il existe, nous venons de l'illustrer plus haut, une base empirique substantielle sur le progrès technique dans de nombreux secteurs de l'économie. Ce fait rend d'autant plus frappant la constatation que la plupart des modèles intégrés du changement climatique ne représentent pas les effets des changements du marché de l'énergie sur le progrès technique.

La Figure 4.8 cadre la discussion en représentant comment les deux concepts usuellement utilisés,

AEEI et changements induits par les prix, sont inclus dans les deux concepts plus larges de progrès technique exogène et endogène.

Parmi les modèles qui représentent le changement technique de façon exogène, beaucoup utilisent un paramètre appelé AEEI pour taux d'amélioration autonome de l'efficacité énergétique (Autonomous Energy Efficiency Improvement). Ce taux, posé constant, est souvent compris entre 0.5% et 1.5% par an. Ces hypothèses ont été critiquées, notamment par Oravetz et Dowlatabadi[65] qui soulèvent les difficultés empiriques de cette représentation du progrès technique, devant l'importance des signaux réels, comme les variations des prix ou les mesures politiques. Il semble aussi possible de classer dans le progrès technique exogène l'utilisation des "backstop technologies[a]" dans des modèles comme GREEN[66] ou MERGE.

D'autres modèles, pour la plupart en simulation, représentent de façon endogène certains aspects du progrès technique. Le travail précurseur de Jorgenson et Wilcoxen[67] représente économétriquement le progrès technique induit par les prix, mais n'est qu'une première étape dans la mesure où les progrès techniques dans l'utilisation de l'énergie sont aussi entretenus par les phénomènes d'apprentissage (learning by doing) ou les rendements croissant d'adoption. Sur ce point, les travaux les plus notables sont ceux menés à l'IIASA[68, 69] , probablement sans équivalents dans le monde par la qualité de la base de données technologiques utilisée. Toutefois, ce sont sans doute les travaux récents de Goulder[70] qui représentent pour la première fois explicitement le fonctionnement des marchés de recherche et développement dans un cadre d'équilibre général.

4.3. Implications

L'enjeu de l'opposition présentée dans les deux dernières sections est immédiat. Dans les modèles où le progrès technique est purement autonome, alors les coûts de réduction des émissions polluantes à une date donnée sont largement indépendants des politiques et des efforts de réduction passés et de la taille des marchés pour les technologies propres. Au contraire, si le progrès technique est purement induit, alors les efforts de réduction stimulent les développements techniques et sociaux, les effets d'échelle et d'apprentissage sont bénéfiques, et cela diminue le coût des efforts de réduction supplémentaires. On est dans ce cas en présence d'une rétroaction positive vertueuse. Les conséquences sur le coût social et donc l'opportunité de réduire la pollution sont donc assez

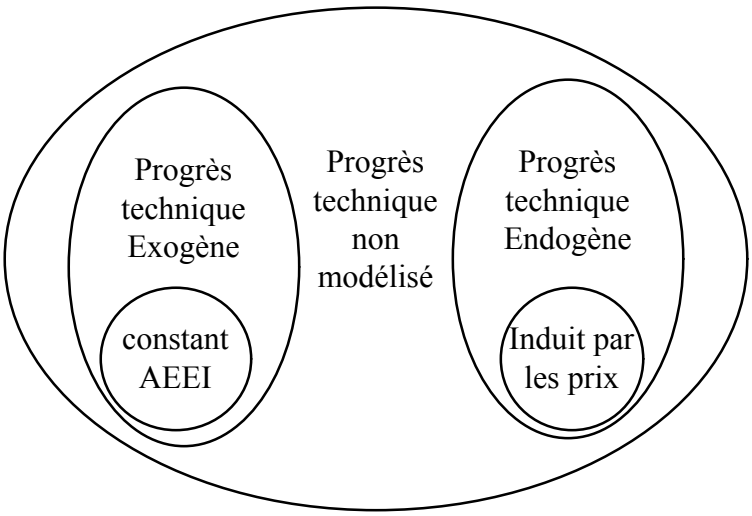


Figure 4.8 : AEEI et progrès technique induit par les prix.

AEEI: Autonomous Energy Efficiency Improvement Rate. Les adjectifs « Exogène » et « Endogène » caractérisent la représentation du phénomène dans le modèle. Si le phénomène, par exemple l'évolution de la consommation d'énergie pour le chauffage des ménages, est expliqué par le modèle, on dira qu'il est endogène. Si il n'est pas expliqué, mais fixé extérieurement au modèle, on dira qu'il est exogène. Schéma d'après Jaffe[64].

[a] Technologies futures fournissant une offre infinie d'énergie à coût marginal constant, comme nous l'avons déjà défini au chapitre précédent.

différentes.

Il convient de dissiper l'idée éventuelle selon laquelle la prise en compte de cette rétroaction permettrait de dé-poser le problème du changement climatique, pourvu que l'on s'abstienne d'entraver la marche naturelle de l'ensemble de l'économie. Certes, avec les technologies de l'information, le changement technique en cours peut être aussi radical que celui conséquent à l'invention de la machine à vapeur. Cela est une source certaine d'efficacité énergétique et de flexibilisation de l'économie. Mais nous avons suffisamment montré qu'on ne peut pas s'attendre à ce que cette évolution, concernant surtout les pays les plus avancés, soit suffisante à elle seule pour diminuer les émissions mondiales de CO_2.

La question centrale qui se pose à ce stade, surtout dans le contexte de la décision séquentielle, est de savoir ce qui crée le progrès technique. Si on suppose que l'essentiel du progrès technique est produit par l'accumulation des connaissances et des dépenses publiques de Recherche-Développement, on pourrait en principe développer de nouvelles technologies, sans pour cela diminuer simultanément les émissions. Dans une "première phase", les Etats pourraient consacrer l'essentiel des ressources contre le changement climatique à la recherche et au développement des solutions énergétiques alternatives. Il s'agirait de développer des prototypes et des pilotes, en vue d'une « deuxième phase » de la résolution du problème, au cours de laquelle se ferait l'essentiel de la réduction des émissions. Une telle approche permettrait de gagner quelques décennies avant d'agir, puisque on pourrait polluer tant qu'on accumule une réserve de progrès technique suffisant.

En conséquence, pour Schneider et Goulder[71], il serait pertinent d'agir politiquement au moyen d'une taxe sur le carbone dès maintenant pour préparer les réductions futures, tout en différant l'essentiel de l'effort de réduction. Toutefois, comme le montre Grubb[72], plusieurs arguments s'opposent à cette politique "Attendre et dépenser, puis courir".

- Premièrement, dans l'hypothèse précédente, l'accélération du progrès technique fait apparaître un flux constant de nouvelles opportunités à coût marginal négatif ou modéré. Mettre en oeuvre ces technologies au fur et à mesure qu'elles sont disponibles n'est pas nécessairement plus coûteux que d'attendre puis de chercher à les faire pénétrer toutes ensemble en une vague. Une conduite en « marche au fur et à mesure », qui exploite au mieux les rendements croissants d'adoption, le « learning by doing », et les externalités de réseau, est donc a priori comparable à la conduite précédente, en une vague.
- Deuxièmement, développer des technologies sans base installée est difficile, car l'histoire montre que le développement favorise nettement les technologies existantes. De plus, faire pénétrer rapidement une vague de nouvelles technologies moins polluantes dans le secteur de l'énergie semble difficile à cause du couplage des technologies. En effet, les différentes composantes des systèmes techniques dépendent les unes des autres et ne peuvent pas être remplacées indépendamment de façon modulaire. Ces deux rétroactions positives induisent des verrouillages technologiques (lock-in) qui font que le passage du temps ne correspond pas nécessairement à l'augmentation du nombre des options possibles[73].
- Troisièmement, il y a lieu de penser que l'essentiel du progrès technique dans un domaine est induit par les changements dans les conditions du marché correspondant, et non par une accumulation de connaissances scientifiques globales ou par la dépense publique de R&D.

Grubb présente des arguments qui donnent à penser que tenter d'accélérer le progrès technique sans vouloir restreindre les émissions polluantes serait une politique peu cohérente et inefficace. Actuellement, une bonne part de la R&D privée vise à l'amélioration des technologies à base de combustibles fossiles. Des politiques contraignantes en matière d'émissions de CO_2 tendraient à créer des incitations appropriées sur les marchés de l'énergie pour recentrer cette R&D sur les technologies moins émettrices.

En conclusion, nous avons vu dans ce chapitre qu'une conception statique du coût de réduction des

émissions semble incompatible avec les évolutions observées dans les systèmes énergétiques. En négligeant la dynamique du progrès technique, une telle conception pourrait surestimer les coûts permanents à long terme et sous estimer les coûts d'ajustement.

Mettons entre parenthèses pour un temps le traitement de l'incertitude et de la précaution pour explorer quantitativement les conséquences de ce biais. Avec l'exposition de DIAM, un Modèle sur la Dynamique de l'Inertie et de l'Adaptabilité, nous allons entrer au chapitre suivant dans la partie de cette thèse plus spécifiquement originale.

Références bibliographiques

[1] John P. Weyant, *Insights From Integrated Assessment*, p. 245-276 in Brian P. Flannery, Klaus R. Koblhase, Duane G. LeVine (eds), *Critical Issues in the Economics of Climate Change*, actes d'un IPIECA Symposium tenu Paris, France, en October 1996.

[2] Claude Henry, *Investment Decisions Under Uncertainty: The « Irreversibility Effect »*, American Economic Review, 64 (6), 1006-1012, dec 1974.

[3] Keneth J. Arrow et Anthony C. Fisher, *Environmental preservation, uncertainty, and irreversibity*, Quarterly Journal of Economics, 88, 312-319, may 1974.

[4] Nicolas Treich, *Economie de l'Incertain: Analyse de la Précaution*, Thèse de doctorat en sciences économiques, Université de Sciences Sociales de Toulouse, présentée et soutenue le 8 décembre 1997.

[5] L. G. Epstein, *Decision Making and Temporal Resolution of Uncertainty*, International Economic Review, 21, 269-283, 1980.

[6] X. Freixas, Jean-Jacques Laffont, *The Irreversibility Effect*, ch. 7 in M. Boyer et R. Kihlström (eds), Bayesian Models in Economic Theory, North Holland, 1984.

[7] R. Jones et J. Ostroy, *Flexibility and Uncertainty*, Review of Economic Studies, 51, 13-32, 1984.

[8] Avinash K Dixit et Robert S. Pindyck, p. 412-418 in *Investment under uncertainty*, Princeton University Press, New Jersey, 1994.

[9] Bruce A. Larson, *Principles of Stochastic Dynamic optimization in resource management: the continuous-time case*, Agricultural Economics, 7, 91-107, 1002.

[10] Pierre Matarasso, *Quelques Remarques sur l'Intégration des Modèles Climatiques, Biophysiques et Économiques dans le Cadre des Recherches sur l'Environnement*, p. 197-206 in François Blasco (coordinateur), Tendance Nouvelles en Modélisation pour l'Environnement, textes sélectionnés des Journées du Programme Environnement, Vie et Société du CNRS à Paris en janvier 1996, paru chez Elsevier, 1997.

[11] Ben Geurts, Arjen Gielen, Richard Nahuis, Paul Tang et Hans Timmer, *WorldScan, an economic world model for scenario analysis*, paper for Review of WorldScan, 9 et 10 novembre 1995 à La Hague, Central Planning Bureau Netherlands, 1995.

[12] R. E. Lucas, *Expectations and the Neutrality of Money*,' Journal of Economic Theory 4, 103-124, 1972.

The Royal Swedish Academy of Sciences, The Scientific Contributions of Robert E. Lucas, Jr., October 1995. En ligne à http://www.nobel.se/announcement-95/ek2.html, accès 16/1/98.

[13] T. M. L. Wigley, Richard Richels, Jae A. Edmonds, *Economic and environmental choices in the stabilization of atmospheric CO2 concentrations*, Nature, 379(6562), 240-243, 18 jan 1996.

[14] H. J. M. de Vries et M. A. Janssen, *Global Energy Futures: An Integrated Perspective with the TIME-model,* section 8.2 on methodology, Global Dynamics and Sustainable Development Program Report Series 18, RIVM report 461502018,Bilthoven, décembre 1996.

[15] Joseph Alcamo (ed.), *IMAGE 2.0: Integrated Modeling of Global Climate Change*, reprinted from Water, Air and Soil Pollution, 76(1/2), 1994, published Kluwer, 1994.

[16] William D. Nordhaus, *To slow or not to slow: the economics of the greenhouse effect*, The Economic Journal, 101, 920-937, juillet 1991.

[17] Alan S. Manne et Richard Richels, *The Berlin Mandate: the costs of meeting post-2000 targets and timetables*, Energy Policy, 24(3), 205-210, 1996.

[18] Jean Pierre Aubin, *Dynamic Economic Theory, A Viability Approach*, Studies in Economic Theory, 5, Springer, 510 pages, 1997.

[19] Ferenc L. Toth, Thomas Bruckner, Hans-Martin Füssel, Marian Leimbach et Gerhard Petschel-Held, *The Tolerable Window Approach to Integrated Assessments*, IPCC Asia-Pacific Workshop on Integrated Assessment Models, Tokyo, Japan, 10-12 mars 1997.

[20] Alan S. Manne et Richard Richels, *Buying Greenhouse Insurance: The Economic Cost of CO_2 Emissions Limits*, p. 120, MIT press, Cambridge, MA, 1992.

Références bibliographiques

[21] Pierre Matarasso et Minh Ha Duong , *Analysis of IAM dynamics and related mathematical problems*, 8 pages, in Rapport Intermédiaire du Projet INASUD, CIRED, 1997.

[22] Philippe Courrège, Pascal Gourdel, Pierre Loridan et Pierre Matarasso, *Simulation, Optimisation et Anticipation : Réflexion sur l'Utilisation des Modèles de Prospective*, document de travail, 1998.

[23] Alan S. Manne, *Intergenerational Altruism, Discounting and the Greenhouse Debate*, Energy Modelling Forum 14 - Meeting #4 - Integrated assessment of climate change, IIASA, Laxenburg, Austria, 21-23 mars 1996.

[24] Alan S. Manne, *Equity, Efficiency and Discounting*, Discounting in Intergenerational Decisionmaking, Presentation à Resource For the Future, Washington, D.C., USA,November 14-15 1996. Résumé en ligne à http://www.rff.org/SEMINARS/WRKSHOPS/discwork.htm, accès le 21/1/98.

[25] Reyer Gerlagh, *Grandfathering emission entitlements and discounting the future, an intergenerational analysis*, in Rapport Intermédiaire du projet INASUD, CIRED, jul 1997.

[26] Stefan Bayer et Dieter Cansier, *Discounting in Climate Change Analysis: Deriving an OLG-Approach*, unpublished, Eberhard-Karls University of Tübingen, jul 1997.

[27] Gunter Stephan et Georg Müller-Fürstenberg, *Global Warming and the Economic Costs of Altruism: a Numerical Thought Experiment*, Institute for Applied Micro-Economics, Gesellschaftsstrasse 49, CH-3012 Bern, non publié, 1997.

[28] Franck Plumpton Ramsey, *A mathematical theory of savings*, Economics Journal, 38, 543-559, 1928.

[29] G. Hardin, *The tragedy of the commons*, Science, 162, 1243-1258, déc 1968.

[30] Alan S. Manne, http://www-leland.stanford.edu/group/MERGE/biblio.htm, *MERGE - Documentation*, accès le 19/1/98.

[31] Massachusetts Institute of Technology Joint Program on the Science and Policy of Global Change, *The MIT Integrated Framework and Components*, en ligne à http://web.mit.edu/globalchange/www/if.html, accès 19/1/98.

[32] William D. Nordhaus, *Managing the Global Commons, The Economics of Climate Change*, MIT Press, Cambridge, MA, 213 p., 1994.

[33] GIEC Groupe de Travail III, *op. cit., résumé du ch. 10*, 1996.

[34] Charles D. Kolstad, *Looking vs. Leaping: the timing of CO2 control in the face of uncertainty and learning*, in Y. Kaya, N. Nakicenovic, W. D. Nordhaus and F. L. Toth (eds), Costs, Impacts and Possible Benefits of CO2 mitigation, IIASA CP-93-2, juin 1993. Actes d'un Workshop tenu à Laxenburg, Austria, 28-30 septembre 1992.

[35] Charles D. Kolstad, *George Bush versus Al Gore, Irreversibilities in the greenhouse gas accumulation and emission control invesment*, Energy Policy, 22(9), 771-778, 1994.

[36] Charles D. Kolstad, *Fundamental Irreversibilities in Stock Externalities*, Journal of Public Economics, 60, 221-233, 1996.

[37] Charles D. Kolstad, *Learning and Stock Effects in Environmental Regulation: The Case of Greenhouse Gas Emisions*, Journal of Environmental Economics and Management, 31, 1-18, 1996.

[38] Edmond Malinvaud, *First Order Certainty Equivalence*, Econometrica, 37, 706-718, 1969.

[39] William D. Nordhaus, *Expert Opinion on Climate Change*, American Scientist, 82 (1), 45-51, 1994.

[40] John P. Weyant, *op. cit.*, 1997.

[41] Gary Hoye et Rodney Wallace, *Near Term Mitigation Policy for Global Change under Uncertainty: Minimizing the Expected Cost of Meeting Unknown Concentration Threshold*, Environnemental Modeling and Assessment 1, 47-57, 1996. Bibliographie de l'auteur à http://www.wesleyan.edu/econ/faculty/yohe.htm, accès 21/1/98.

[42] Alan S. Manne et Richard Richels, *Buying Greenhouse Insurance: The Economic Cost of CO2 Emissions Limits*, MIT Press, 1992.

[43] Alan S. Manne et Richard G. Richels, *Stratégies de Protection contre le Risque: Prise de Décision en cas d'Incertitude*, Conférence Internationale sur les Aspects Économiques du Changement Climatique, OCDE, OCDE/GD(93)77, Paris, 1993.

Références bibliographiques

[44] Alan S. Manne, http://www-leland.stanford.edu/group/MERGE/biblio.htm, *MERGE - Documentation*, accès le 21/1/98.

[45] Stephen C. Peck et Thomas J. Teisberg, *Global Warming Uncertainties and the Value of Information: An Analysis using CETA*, Resource and Energy Economics, 15, 71-97, 1993.

[46] Alan S. Manne et Richard Richels, *The Berlin Mandate: the costs of meeting post-2000 targets and timetables*, Energy Policy, 24 (3), 205-210, 1996.

[47] Stephen C. Peck et Thomas J. Teisberg, *The importance of nonlinearities in Global Warming Damage Costs*, in Joel Darmstadter et Michael A. Toman (eds.), Assessing Surprises and Nonlinearities in Greenhouse Warming, Proceedings of an interdisciplinary workshop tenu à Resource For the Future, Washington, DC, USA, may 1993

[48] James K. Hammitt, Robert J. Lempert et Michael E. Schlesinger, *A sequential decision strategy for abating climate change*, Nature, 357; 315-318, 1992.

[49] Joseph Alcamo, Eric Kreileman et Rik Leemans, *Global Models meet Global Policy*, Global Environmental Change, 6 (4), 255-259, 1996

[50] Ian G. Enting, *Analysing the conflicting requirements of the framework convention on climate change*, Climatic Change, 31, 5-18, 1995.

[51] Ferenc L. Toth, Thomas Bruckner, Hans-Martin Füssel, Marian Leimbach et Gerhard Petschel-Held, *The Tolerable Window Approach to Integrated Assessments*, IPCC Asia-Pacific Workshop on Integrated Assessment Models, Tokyo, Japan, 10-12 mars 1997.

[52] Erica L. Plambeck et Chris Hope, *PAGE95 An Updated Valuation of the Impacts of Global Warming*, Energy Modelling Forum 14 - Meeting #4 - Integrated assessment of climate change, Laxenburg, Austria, 21-22 mars 1996.

[53] Chris Hope, John Anderson et Paul Wenman, *Policy Analysis of the Greenhouse Effect, an application of the PAGE model*, Energy Policy, 21 (3), Special issue on Policy Modelling for Global Climate Change, 327-228, mar 1993.

[54] Chris Hope, *A Fast and Simple Model of Global Warming from Greenhouse Gas Emissions*, Research Papers in Management Studies, University of Cambridge, 1992-1993 n°2, novembre 1992.

[55] Chris Hope et Philip Maul, *Valuing the Impacts of CO_2 emissions*, Energy Policy 24(3), 211-219, 1996.

[56] John P. Weyant, *op. cit.*, 1997.

[57] GIEC Groupe de Travail III, *op. cit., ch. 10*, 1996.

[58] Alistair Ulph et David Ulph, *Global Warming, Irreversibility and Learning*, The Economic Journal, 107 (442), 636-650, may 1997.

[59] Jane Lubchenco, *Entering the Century of the Environment: A New Social Contract for Science*, Science, 279, 491-497, 23 jan 1998.

[60] Plus particulièrement chapitre 2, section 3.5 et chapitre 3, section 2.4.

[61] Dermot Gately, *The Imperfect Price-Reversibility of World Oil Demand*, The Energy Journal, 14 (4), 163-182, 1993.

[62] Joyce Dargay et Dermot Gately, *The imperfect price reversibility non-transport oil demand in the OECD*, Energy Economics, 17 (1), 59-71, 1995.

[63] John P. Weyant, *Technological Change and Climate Policy Modeling*, Workshop on Induced Technological Change and the Environment, IIASA, Laxenburg, Austria, 26-27 juin 1997.

[64] Adams B. Jaffe, *Thoughts on decomposing changes in energy efficiency and technological change*, mimeo, 26 mars 1996.

[65] Matthew Oravetz et Hadi Dowlatabadi, *Is there Autonomous Energy Efficiency Improvement ?,* Carnegie Mellon University, mimeo, 1995.

[66] Jean-Marc Burniaux, John P. Martin, Giuseppe Nicoletti et Joaquim Oliveira Martins, *GREEN -- A Multi-Region Dynamic General Equilibrium Model for Quantifying the Costs of Curbing CO2 Emissions: A Technical*

Références bibliographiques

Manual, OCDE, Department of economics and statistics, Resource Allocation Division, Working Papers 104, juin 1991.

[67] Dale W. Jorgenson et Peter J. Wilcoxen, *Intertemporal Equilibrium Modeling of Energy and Environmental Policies*, 50th congress of the International Institute of Public Finance, Cambridge, MA, 22-25 août 1994.

[68] Sabine Messner, A. Golodnikov et A. Gritsevskii, *A Stochastic Version of the Dynamic Linear Programming Model MESSAGE III*, Energy, 21(9), 775-784, 1996.

[69] Sabine Messner, *Endogeneized Technological Learning in an Energy Systems Model*, IIASA Working Paper, nov 1995.

[70] Stephen H. Schneider et Lawrence H. Goulder, *Achieving Low-Cost Emissions Targets*, Nature 389, 13-14, 4 sep 1997.

[71] Lawrence H. Goulder et Stephen H. Schneider, *Induced Technological Change, Crowding Out, and the Attractiveness of CO_2 Emissions Abatement*, presentation au CIRED, oct 1996.

[72] Michael J. Grubb, *Technologies, Energy systems and the Timing of CO2 Emissions Abatement,* Energy Policy, 25 (2), 159-172, février 1997.

[73] Hourcade et Robinson, 1996.

Chapitre 5. DIAM - Modèle Dynamique Inertie-Adaptabilité

Nous exposons dans ce chapitre un Modèle pour étudier la Dynamique de l'Inertie et l'Adaptabilité des systèmes énergétiques, DIAM. L'inertie renvoie aux coûts d'ajustements. L'adaptabilité correspond à l'idée que grâce au progrès technique induit, à long terme, les systèmes énergétiques sont capables de devenir à la fois économiquement et écologiquement efficaces. Ce modèle résulte de nos travaux initiaux avec le Dr. Michael J. Grubb et notre camarade Dr. Thierry Chapuis, présentés dans plusieurs séminaires à l'étranger[1, 2] et en France[3], puis publiés en anglais dans une revue internationale à comité de lecture[4].

En reprenant la mise en place du chapitre précédent, nous commencerons par exposer synthétiquement la problématique. Puis nous présenterons DIAM, un modèle d'optimisation dynamique qui a pour but d'étudier comment la réponse optimale au problème de l'effet de serre est affectée par les possibilités d'évolution de la technologie. Ses résultats confirment que la question des coûts d'ajustement et du progrès technique induit est fondamentale dans l'analyse des réponses économiquement efficaces au changement climatique.

1. Introduction

1.1. Cadre conceptuel

Le but du travail exposé ici est d'ajouter deux nouvelles dimensions au débat sur les coûts de réduction des émissions polluantes. Il s'agit de la question des coûts d'ajustement et du progrès technique induit par les contraintes institutionnelles dans les systèmes énergétiques.

Pour cela, nous mettons en oeuvre un modèle très agrégé de la réduction des émissions qui représente *directement* les coûts d'ajustement et qui nous permet d'examiner *indirectement* l'effet du progrès technique induit.

- Comme nous l'avons expliqué plus haut, le progrès technique induit permet de considérer que dans le long terme, les nouvelles technologies peu polluantes seront comparables en efficacité économique aux technologies actuelles. Négliger cet aspect dynamique conduit donc à surestimer le coût de réduction à long terme. Pour dissiper une confusion éventuelle, il importe de distinguer l'adaptabilité dont il est question dans DIAM, qui désigne l'effet à long terme du progrès technique induit dans le secteur énergétique, de ce qu'on appelle l'adaptation, qui désigne les mesures visant à limiter les impacts négatifs des changements climatiques.
- Si la pénétration des générations de capital plus performantes au regard des émissions de gaz à effet de serre se fait au rythme naturel de dépréciation de la base matérielle de l'économie, alors cela mobilisera moins de ressources que si elle se fait à un rythme accéléré entraînant l'obsolescence prématurée des équipements en place. Nous avons montré précédemment que la plupart des modèles sous estiment les coûts d'ajustement qu'il y aurait à réduire rapidement la pollution.

		Coûts d'ajustement	
		Fort	Faible
Coûts permanents	Fort	Ascension himalayenne	Augmenter la teneur en truffe
	Faible	Diversifier dans le confit d'oie	

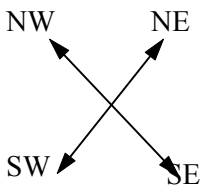


Tableau 5.1 : Exemples de coûts permanents et de coûts d'ajustements.

Si on croise ces deux idées, diverses situations peuvent surgir selon que les coûts d'ajustements sont forts ou faibles devant les coûts à long terme. Examinons sur des exemples concrets à quoi correspondrait les diverses situations illustrées Tableau 5.1.

Coûts permanents prédominants : Imaginons une fabrication artisanale de boudin blanc. Traditionnellement la fabrication de boudins nécessite 1 % de truffes du Périgord et 99 % d'autres ingrédients. Pour améliorer la qualité de son produit l'artisan décide d'augmenter la quantité de truffes à l'intérieur de ses boudins et de porter cette dernière à 1.5 %. Le prix des truffes étant bien plus élevé que celui de chacun des autres ingrédients une telle décision va accroître le prix unitaire de chacun des boudins vendu mais en revanche le coût transitoire sera très faible car il n'impliquera de la part de l'artisan aucune manipulation, ni savoir-faire supplémentaire.

Coûts d'ajustement prédominants : La fabrique de boudins blanc décide un jour de diversifier sa production. Il lui faut pour cela produire 50 % de boudins blancs et 50 % de confit de foie de volaille. Le prix de revient de chacun de ses deux mets est sensiblement le même si bien que la diversification ne coûtera rien à long terme. Le coût transitoire d'adaptation est par contre élevé. On peut citer à titre d'exemple la découverte des meilleures adresses pour se fournir de chacun des ingrédients, le savoir-faire des cuisiniers ou plus simplement les ustensiles nécessaires à la fabrication du nouveaux produits...

Superposition de coûts permanents et de coûts d'ajustement importants : Ce cas peut s'illustrer par la fatigue ressentie lors d'une ascension himalayenne de plusieurs jours. Cette fatigue provient à la fois de deux causes : l'altitude et l'effort de marche quotidien qui permet chaque soir de bivouaquer un peu plus haut que la veille. Il correspond probablement le mieux au coût social de la réduction des émissions polluantes, et est représenté Figure 5.1.

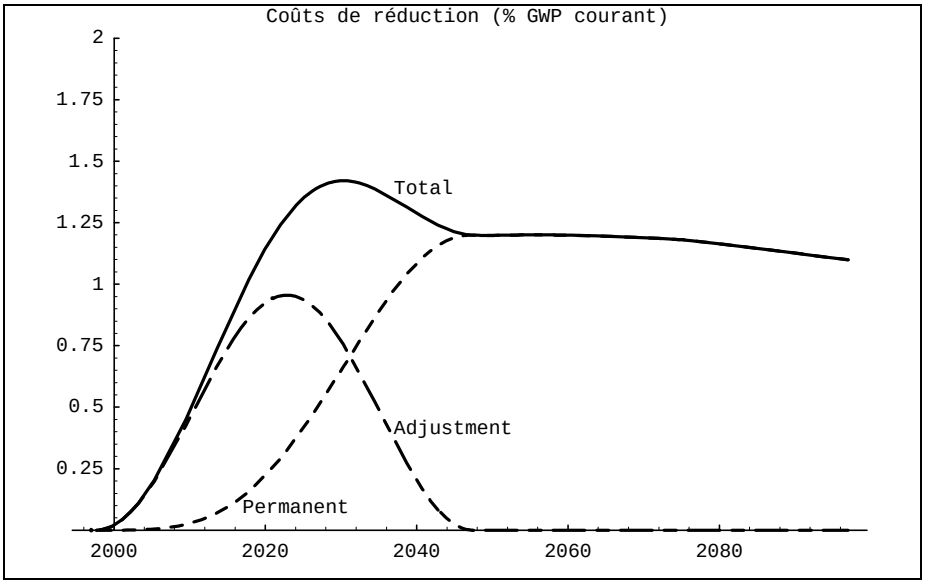


Figure 5.1 : Décomposition du coût de réduction.

Une décomposition possible des coûts permanents et des coûts d'ajustement concernant la réduction des émissions de CO_2, sans actualisation. On a ici considéré un programme de réduction suivant une courbe en S, visant une réduction de 50% au bout de 50 ans.

A côté de la question des parts relatives des coûts permanents et des coûts d'ajustement dans le coût total, le Tableau 5.1 permet de poser une seconde question, qui est celle de l'importance de ce coût total. En termes géométriques, dans le Tableau 5.1, se déplacer selon la direction de la diagonale principale (NW-SE) correspond à une variation du coût total, les parts relatives des deux sortes de

coût étant inchangées. Au contraire, se déplacer selon l'autre diagonale (NE-SW) correspond à un raisonnement à coût constant.

Cette question seconde a son importance dans la détermination des politiques climatiques. En effet, toutes choses égales par ailleurs, lorsque les coûts de réduction augmentent, le niveau de réduction optimal diminue. Dans la mesure où la considération précédente apporte une réponse relativement triviale, nous avons préféré dans la suite raisonner à coût total constant, pour isoler l'effet des variations de la part relative des coûts d'ajustement.

L'enjeu n'est donc pas ici de remettre en question l'ordre de grandeur des évaluations de coût de réduction, mais de s'interroger sur la répartition dynamique de ces coûts : alors que les modèles tendent à décrire une situation où les coûts permanents dominent, que se passe t il si on fait l'autre hypothèse ?

1.2. Cadre formel

Pour définir le coût de réduction des émissions de gaz à effet de serre, deux hypothèses sont utilisées. Premièrement, on se ramène à un indicateur unique en agrégeant les différents gaz à effet de serre. Deuxièmement, on se donne un profil temporel d'émissions de référence pour ce gaz E_t^{ref} . Dans ces hypothèses, si les émissions réalisées sont

Equation 5.1 : $$E_t = E_t^{ref} (1 - x_t)$$

alors on dira que la réduction à la date t est x_t . Ces hypothèses, usuelles, demandent toutefois quelques explications.

⇒ *Agrégation des polluants*

Nous allons dans la suite nous placer au niveau le plus agrégé, c'est à dire que nous considérerons un seul pollueur, le monde dans son ensemble, et un seul polluant, le dioxyde de carbone.

De nombreuses espèces chimiques contribuent au changement climatique. La vapeur d'eau (H_2O) est la première d'entre elles, et à coté du dioxyde de carbone (CO_2), le méthane (CH_4), l'hémioxyde d'azote (N_2O), et l'ozone (O_3) sont les principaux gaz à effet de serre. Le dioxyde de soufre (SO_2) et les chlorofluorocarbones sont aussi très importants pour la chimie de l'atmosphère. Comme nous l'avons vu, les efforts politiques visent l'ensemble des gaz à effet de serre, sans exclusivité du CO_2 .

Mais il est de pratique usuelle de considérer le CO_2 comme une sorte de numéraire, un gaz de référence, dans lequel les émissions de tous les autres gaz sont convertibles. On appelle potentiel de réchauffement global, ou Global Warming Potential (**GWP**) le taux de change. Il est naturel de prendre le GWP du CO_2 comme unité car c'est le gaz dont les émissions contribuent le plus à l'augmentation du forçage radiatif. Il est responsable d'environ 80% de l'impact lorsque l'on pondère les gaz selon leur GWP. En effet, bien que par molécule il soit relativement moins actif, il est émis en plus grande quantités et c'est celui qui reste le plus longtemps dans l'atmosphère une fois émis.

Si la notion de GWP permet d'agréger les émissions, celle d'équivalent CO_2 permet d'agréger les concentrations. L'équivalent CO_2 d'un mélange de CO_2 et d'autres gaz à effet de serre est la concentration de CO_2 qui entraînerait seule un forçage radiatif de même importance. Si on prend 278 ppmv comme valeur de la concentration préindustrielle du CO_2 , le double de ce chiffre, soit 556 ppmv, correspond au doublement de la concentration de CO_2 seul. A ce niveau, on aurait certainement dépassé le niveau de référence des études sur le changement climatique, comme le souligne le GIEC[5] :

> *Comme les effets des gaz à effet de serre sont additifs, la stabilisation de la concentration de CO_2 à n'importe quel niveau situé au dessus de 500 ppmv environ est susceptible de conduire à des variations dans l'atmosphères correspondant au moins au doublement de la concentration de gaz à effet de serre par rapport à l'époque préindustrielle.*

Ces deux notions montrent que l'agrégation en un seul gaz à effet de serre n'est donc pas totalement dépourvue de fondements pratiques. Toutefois, il importe de préciser que, s'il serait possible de réinterpréter le modèle qui va suivre en termes de concentrations et émissions équivalentes, celui ci est effectivement calibré sur la dynamique du CO_2 seul.

⇒ *Profils temporels de référence*

Lorsqu'on parle des réductions des émissions polluantes, on se place implicitement par rapport à un scénario décrivant ce qui se passerait si aucun effort n'était fait. La définition de ce chemin de référence comporte une large part d'incertitude et d'arbitraire. Il est défini par le point zéro des coûts de réduction. C'est le niveau d'émission à la date *t* en deçà duquel il est coûteux de descendre.

Plusieurs profils de référence notablement différents existent. On remarque par exemple que le scénario[a] central du Conseil Mondial de l'Energie[6], prévoit des émissions de gaz carbonique dues à la combustion de combustibles fossiles en 2020 de 8.4 GtC, soit une augmentation de 42% par rapport à 1990. Il suppose que « *les émissions [...] de l'OCDE seront en l'an 2020 au même niveau ou plus faibles*.» (op. cit., par. 3). Le GIEC[7] propose une autre référence : 10.7 GtC en 2025, la part des pays de l'OCDE passant de 2.8 à 3.5.

Les scénarios sont révisés relativement fréquement à l'échelle de temps des bouleversements importants dans la structure des marchés de l'énergie. Nous n'étudierons pas ici les effets de différents scénarios de référence, mais nous adopterons la convention usuelle qui est de se baser sur le scénario central du GIEC, à savoir IS92a à la date des travaux.

[a] On peut faire une différence sémantique entre profil temporel et scénario. Alors qu'un profil temporel est simplement une fonction du temps, un scénario correspond à un ensemble d'hypothèses techniques, économiques et sociales bien spécifié et cohérentes entre elles. Les modèles servant à déterminer des profils temporels à partir de scénarios, la métonymie est courante.

2. DIAM : un Modèle sur la Dynamique de l'Inertie et de l'Adaptabilité

Par beaucoup d'aspects DIAM est un des modèles d'optimisation intertemporelle sur le changement climatique les plus simples. Le code de plusieurs versions sont annexés à cette thèse, en *Mathematica*, GAMS ou EXCEL. Nous expliquerons page 142 pourquoi ces versions diffèrent légerement entre elles, et pourquoi aucune ne correspond strictement aux équations décrites dans ce chapitre. Afin de permettre une vue d'ensemble, celles ci sont récapitulées page 150.

2.1. Maquette physique

⇒ *Fonction objectif*

Pour obtenir une base analytique et chiffrée de la discussion, il s'agit ici d'une analyse coût-bénéfice intertemporelle, qui met en balance le coût de la réduction des émissions aux impacts causés par le changement climatique. L'approche utilisée, l'optimisation a été discutée dans son principe au 1.2 du chapitre précédent. Ajoutons dans ce cas particulier que celle-ci permet une comparaison avec plus directe les résultats obtenus par d'autres modèles, et que les économistes sont familiers avec ses techniques même s'ils en reconnaissent les limites.

Dans ce cadre coût-bénéfice sans incertitude, DIAM calcule le sentier optimal de réduction des émissions de CO_2 noté $\boldsymbol{x} = (x_t)_{1990 < t < 2300}$ qui minimise la somme actualisée des coûts totaux associés au problème de l'effet de serre.

Nous noterons $C(t)$ le coût de réduire les émissions et $D(t)$ le dommage qui dépend de la concentration. La réduction optimale $x^*(t)$ minimise le coût total intertemporel actualisé au taux ρ, sous la contrainte qu'à partir d'une date t_{stab}, la concentration $M(t)$ est stabilisée. Le niveau de stabilisation est calculé par le modèle. Le programme est défini Equation 5.2.

Equation 5.2 : $$\underset{\boldsymbol{x}}{Min} \sum_{t=t_0}^{t_n-1} (1+\rho)^{-t} (D(t) + C(t))\, dt, \text{ pour } \boldsymbol{x} \text{ tel que } \forall\, t \geq t_{stab},\ M(t) = M(t+1)$$

⇒ *Emissions*

Le classement du GIEC distingue trois sources d'émissions anthropiques : les combustibles fossiles, la production de ciment, et le changement de l'usage des sols. Les deux premières sources s'ajoutent pour former les émissions dites industrielles. Les émissions totales sont donc formées des émissions industrielles (dont la plus grande part provient de l'énergie) et des émissions provenant la déforestation et des changement dans l'usage des sols.

Dans la suite nous envisagerons seulement le coût de réduction des émissions industrielles, et nous prendrons les autres comme exogènes. Cela demande à être justifié, sachant que les émissions provenant de changements dans l'usage des sols constituent aujourd'hui une part non négligeable des émissions totales, environ un cinquième. Exclure du discours les problèmes liés à la terre ne restreint pas fondamentalement la portée des conclusions pour plusieurs raisons[a]; dont la principale est que les

[a] Les considérations liés à l'usage des sols sont importantes pour les politiques climatique pour deux causes principales. Réduire la déforestation est un moyen comparativement bon marché de ne pas émettre de carbone, et les plans et programmes de reforestation à l'heure actuelle mettent sérieusement en avant le bénéfice global de la capture du carbone. Le climat et le sol, à l'échelle d'une région, interagissent fortement puisqu'ils déterminent tous deux les précipitations, les températures, les écosystèmes, en un mot le biome, avec de nombreuses irréversibilités possibles. Ces deux causes ne peuvent elles pas être conceptuellement détachés du problème de la réduction des émissions de carbone d'origine fossile ? Les mécanismes de régulation des deux types d'émissions ne diffèrent ils pas profondément ?

émissions industrielles, déjà beaucoup plus importantes en volume, le deviennent davantage chaque année. A terme, les réserves de carbone fossile sous forme de pétrole, de gaz et surtout de charbon sont nettement plus élevées que les stocks de carbone dans la biomasse et le sol soumis à la pression humaine.

Notant $E(t)$ les émissions réalisées à la date t, qui dépendent de $x(t)$, nous écrirons donc[a] :

Equation 5.3 : $$E(t) = E^{landuse}(t) + [1 - x(t)]\, E^{industrial}(t)$$

La position $x = 0$ correspond à un scénario de référence, dans lequel aucune ressource n'est allouée à la réduction des émissions polluantes. C'est à peu près la situation actuelle. Les objectifs nationaux d'émission pris à la suite de la convention climat par les pays de l'annexe I n'ont pas entraîné de programme de réduction sensible dans les pays de l'OCDE. Les pays peu et moins industrialisés, pour leur part, ne s 'étaient engagés à rien. Au total, on est donc proche du scénario de référence.

La croissance de $x(t)$ représente le progrès vers une société peu polluante. La position $x = 1$ correspond à un idéal dans lequel les émissions industrielles nettes sont nulles.

⇒ ***Concentrations***

Ces émissions sont ensuite transformées en concentrations à l'aide d'un modèle linéaire[b] :

Equation 5.4 : $$M(t) = M_{preindustrial} + \frac{1}{2.123}\left[\sum_{s=1765}^{t} R(s)\, E(t\text{-}s) \quad - \quad \tfrac{1}{2}\, E(t) \right]$$

La fonction R , fonction de réponse atmosphérique globale, s'explique en langage d'économistes comme une sorte d'actualisation des émissions passées. La constante 1 / 2.123 représente la conversion d'unités entre émissions et concentration, compte tenu de la masse de l'atmosphère. Le terme ½ $E(t)$ est une correction technique provenant du fait que le passage émissions-concentration se fait dans un temps continu qui est discrétisé ici.

Le modèle linéaire ci dessus provient directement des sciences du climat[8, 9]. En termes plus précis, la valeur R(s) est la fraction des émissions de la date t-s qui, n'ayant pas été absorbées par les divers puits, restent présentes dans l'atmosphère à la date t et contribuent donc au forçage radiatif.

2.2. Maquette socio-économique

⇒ ***Impact du changement climatique***

Le dommage causé par le changement du climat $D(t)$ est écrit directement en fonction de la concentration, soulignant la différence entre changement climatique et réchauffement global :

---

[a] La définition de x est donc $x(t) = [\, E^{ref}(t) - E(t)\,] / E^{industrial}(t)$

[b] La somme ci dessous approxime $\int_{s=1765}^{t} R(s)\, E(t\text{-}s)\, ds$ par la méthode des trapèzes.

Le terme correctif en 1/2 $E(1765)$ R(t-1765) s'élimine car $E^{industrial}(1765) = E^{landuse}(1765) = 0$.

L'autre terme correctif est ½ E(t) R(0), et on a R(0) = 1.

Equation 5.5 : $$D(t) = c_{2x}\,(1 + g_{damages})^t \frac{M(t - d_{lag}) - M_{nodamage}}{M_{2x} - M_{nodamage}}$$

De toutes les relations du modèle DIAM, celle qui représente l'impact du changement global est sans doute la plus mal connue; c'est pourquoi l'équation retenue reste très simple. Le coût des impacts croît linéairement avec la concentration, en passant par zéro pour une concentration $M_{nodamage}$ fixée. Il est calibré par le facteur de proportionnalité c_{2x}, qui est la valeur des dommages causés par une concentration double de la concentration préindustrielle. L'échelle des dommages croit à un taux $g_{damages}$, afin de capter le fait qu'ils augmentent avec (mais plus lentement que) la richesse économique.

A cause de l'inertie thermique des océans, la répercussion d'une hausse de la concentration de CO_2 sur la température moyenne s'étale et n'atteint son effet maximum qu'après plusieurs décennies[10, a]. Nous incluons donc dans DIAM un retard d_{lag}. Ce retard représente le temps de latence entre les variations en concentration et celles en impact climatique.

⇒ ***Coûts de réduction***

C'est le coût $C(t)$ qui se compare aux bénéfices de la réduction des émissions et du changement du climat.

Equation 5.6 : $$C(t) = \frac{1}{(1 + r_{autonome})^t} \frac{E^{industrial}(t)}{E^{industrial}(t_0)} \left[c_a\, x(t)^2 + c_b\, [x(t) - x(t\text{-}1)]^2\right]$$

Notons que la société supporte un **coût de réduction** lorsque x dépasse 0, c'est à dire lorsqu'on amène les émissions à un niveau inférieur à la référence. Par définition, toutes les actions rapportant un double dividende sont effectuées dans le scénario de référence.

- Le premier facteur représente l'effet d'un progrès technique autonome : un progrès inévitable qui rend la réduction des émissions de plus en plus facile avec le temps.
- Le second facteur représente la taille du système produisant les émissions. Dans la version 1.0 de DIAM[11], nous posions que les coûts de réduction augmentent comme la richesse totale. Ici, l'augmentation de E^{ref} est linéaire, découplée de l'augmentation exponentielle de la richesse dans IS92a, conformément à l'histoire énergétique contemporaine de l'OCDE.
- Le facteur entre crochet est celui qui dépend de la réduction des émissions proprement dites. C'est en fait le seul facteur endogène au modèle. Il est composé de deux termes :

  ⇒ Le premier terme en $c_a\, x(t)^2$ représente la perte permanente d'efficacité économique liée à la contrainte sur la pollution. Utiliser des alternatives aux énergies fossiles va réallouer l'usage des ressources dans l'économie, notamment du capital, du travail et de la monnaie. Cela pourrait diminuer d'une façon durable le bien-être social. Il semble clair que la loi des rendements décroissants s'applique à la diminution des émissions, à une date donnée. La forme quadratique, et non linéaire, de cette composante de la fonction de coût reflète ces rendements décroissants. Cette forme est également utilisée dans d'autres modèles pour approximer des

[a] Usuellement, les modèles font intervenir plus concrètement l'augmentation de la température pour déterminer les impacts. Suivre cette interprétation ici consisterait à dire que la température dépend de la concentration à la date $t\text{-}d_{lag}$, et que l'impact dépend linéairement de la température. Mais cela ne nous a pas satisfait pour deux raisons. Premièrement, la température ne capture qu'une fraction du changement climatique, puisque c'est une moyenne qui lisse les disparités géographiques et temporelles dont les variations ont aussi de l'importance pour les impacts. Deuxièmement, aurions été insatisfaits de l'équation $T = a + b\, C(t - d_{lag})$, dans la mesure où il existe des alternatives tout aussi linéaires et plus précises du style $T = a + a_0\, C(t) + a_1\, C(t - 1) + a_2\, C(t - 2)$...

données empiriques dispersées.

⇒ Le second terme, en $c_b\,[x(t) - x(t\text{-}1)]^2$ représente les coûts d'ajustement. Ces coûts proviennent de plusieurs sources, comme la réallocation transitoire des ressources dans la Recherche et Développement ou l'obsolescence prématurée d'équipements industriels et d'infrastructures. Il semble aussi intuitif de dire que plus on demande une réforme rapide, plus le coût social est élevé, d'où la forme quadratique.

On pourrait demander une justification plus précise des exposants et des constantes intervenant dans la fonction de coût. Il est vrai que nous avons fixé les exposants et les constantes en référence à la littérature préexistante, sans reprendre à la source les études empiriques. Il serait aussi souhaitable de justifier la forme choisie à partir de considérations plus microéconomiques faisant par exemple intervenir des générations de capital. Si cela n'est pas fait dans cette thèse, c'est uniquement parce que nous n'y sommes pas arrivés.

Toutefois, ces critiques pèseront peut être moins lourdement si l'on se remémore que DIAM a pour but premier, non pas de tenter représenter le plus finement possible une réalité préexistante, mais d'expliciter clairement la différence conceptuelle entre d'une part les coûts d'ajustement, et d'autre part les coûts à long terme. C'est pourquoi l'Equation 5.6 fait une séparation nette et simple, additive, entre ces deux notions.

Une étude de sensibilité poussée que nous exposerons dans la suite permettra de montrer que nos résultats restent vrais dans une relativement large de valeurs numériques, et nous testerons dans un chapitre ultérieur une forme de fonction de coût très différente.

2.3. Mode d'emploi

L'utilisation du modèle exploite la séparabilité entre les coûts permanents et les coûts d'ajustement. Le point de vue est que dans la plupart de la littérature, les premiers sont surestimés et seconds sous estimés. Il s'agit donc de comparer la description du monde que font ces modèles avec son opposée, que nous affirmons être plus proche de la réalité. Nous examinerons si des coûts à long terme plus faibles, et des coûts d'ajustement plus élevés ne conduiraient pas à une politique optimale à la fois plus ambitieuse et plus prudente, c'est à dire à polluer moins à court et à long terme.

Cette discussion s'appuie formellement sur le jeu des valeurs numériques de c_a et c_b dans la fonction de coût de réduction. Les valeurs de c_b petites correspondent à un système qui peut évoluer rapidement à bas coût. A la limite, lorsque $c_b = 0$, le modèle est sans inertie au sens où la vitesse de réduction ne compte pas. A l'opposé, c_a petit correspond à une vision marquée par l'adaptabilité des systèmes énergétiques aux contraintes d'environnement. Lorsque $c_a = 0$, le modèle est celui d'une société déformable, dans laquelle à long terme la réduction atteinte ne pèse pas sur le bien-être, une fois qu'on a fait l'effort d'y parvenir. Selon le rapport c_b / c_a, DIAM permet bien de comparer les deux visions du monde différentes envisagées.

3. Paramétrisation

3.1. Paramètres géophysiques

⇒ ***Grille temporelle***

Le choix des dates de départ et de fin sont justifiées d'une part par la date de parution de ce travail, 1996, et de l'autre par la nécessité de prendre en compte les effets à long terme :

Equation 7 :

$$t_0 = 1997$$

$$t_n = 2300$$

C'est à ce stade que des considérations pratiques entrainent une divergence entre les diverses implémentations du modèle. En effet, conserver des performances en temps de calcul acceptables sur ordinateur personnel dans un langage de haut niveau ne permet pas de discrétiser avec un pas de une année, mais impose d'utiliser donc une subdivision { t_0, ..., t_n.} de l'intervalle [1997, 2300][a].

Dans un traitement simple, mis en oeuvre sous GAMS, on suppose que toutes les fonctions intervenant sont en escalier, c'est à dire constantes sur chacun des intervalles de la subdivision, choisie régulière avec un pas de 10 ans.

Nous avons effectué un traitement plus sophistiqué pour la version sous *Mathematica*. Nous supposons que $\boldsymbol{x}$ est linéaire continue, et non constante, par morceaux et la subdivision utilisée est irrégulière, plus fine au début, plus grossière à la fin. Ces choix compliquent les formules de quadrature utilisées, mais permet à la fois de représenter les effets à long terme du changement climatique et de conserver une certaine finesse de représentation des politiques à court terme, conformément aux souhaits exprimés par certains utilisateurs finaux des modèles[12].

Le choix de la borne supérieure, l'horizon du modèle, mérite aussi discussion : imposer la borne supérieure t_n revient à négliger les coûts et dommages postérieurs[b] à t_n . Cette approximation est cependant courante: W. R. Cline, par exemple, qui place le long terme au centre de son argumentation, utilise pour cela un modèle défini jusque en 2275 seulement. Le choix de t_n = 2300 est donc justifié à l'égard de la littérature. On peut certes parfois rencontrer des projections climatiques à l'échelle du millénaire, mais sans contenu économique.

De plus, dans un modèle basé sur l'utilité intertemporelle comme DIAM, l'actualisation justifie aussi un horizon fini puisque les gains et les pertes à très long terme sont négligeables. Une annuité constante de 100F débutant en 2300, composée à 3% correspond aujourd'hui à 1.4 centime.

[a] Un autre problème technique est que le choix de l'intervalle et de sa subdivision peut entraîner des problèmes d'oscillation dans l'optimisation, mais on vérifie que les résultats sur les 50 prochaines années n'en sont pas sensiblement affectés.

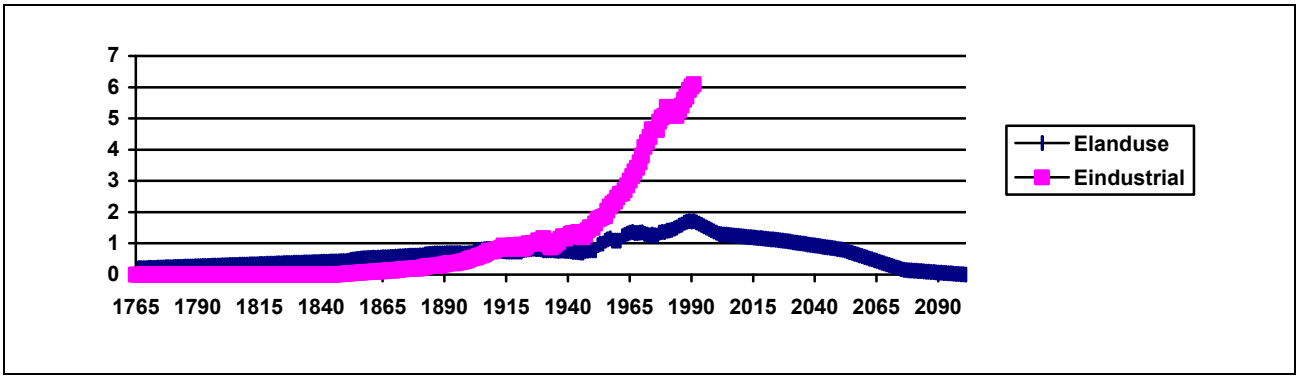
[b] Toutefois, en ce qui concerne les dommages, nous contournons en partie cet effet d'horizon. La structure linéaire du modèle permet de calculer les dommages totaux actualisés jusqu'à l'infini pour 1 GtC émise à une date t quelconque. Nous négligeons donc seulement les dommages des émissions postérieures à t_n, et non les dommages postérieurs à t_n .

Figure 5.2 : Profils d'émissions de référence, $E^{industrial}$ *et* $E^{landuse}$.

Unités: temps en années, flux annuels de carbone en gigatonnes de C. Source CDIAC, fichiers deforest.all et fossil.dat. A partir de 1990, les émissions industrielles sont obtenues par différence à partir des émissions totales qui suivent une tendance linéaire.

$E^{landuse}$*: D'après papers from IPCC Feedbacks Meeting, Woods Hole, Oct. 1993. Extrapolation linéaire de 1765 à 1850, étendu jusqu'à 2100 en se basant sur la déforestation de IS92a modifié ainsi: atteind zéro en 2100 et ajustement linéaire sur Houghton pour la période 1990-2000. Source: R.A. Houghton, Woods Hole Research Center, Woods Hole, Massachusetts, USA*

Emissions de carbone fossile pour 1860 - 1984 comme tabulé dans "Trends 91: A Compendium of Data on Global Change". Valeurs de 1985 à 1990 mises à jour selon G. Marland (personal communication). Données de 1840 à 1860 obtenues par interpolation linéaire. Valeurs antérieures à 1840 mises à zéro.. Sources: (1) Données de 1860 à 1949 -- C. D. Keeling, Scripps Institution of Oceanography, La Jolla, California, USA (2) Données à partir de 1950 -- G. Marland et T. A. Boden, Oak Ridge National Laboratory, Oak Ridge, Tennessee, USA



⇒ *Emissions passées*

Le modèle du cycle du carbone utilise les émissions observées entre 1765 et 1997 représentées Figure 5.2. Le choix des chemins de référence passés $\boldsymbol{E}^{industrial}$ et $\boldsymbol{E}^{landuse}$ ne pose pas de problème théorique particulier, seulement des problèmes de définition et de mesure. Nous avons travaillé avec les données utilisées par le GIEC.

⇒ *Emissions de référence futures*

La référence des émissions, $E^{ref}(t)$, est basée sur le scénario IS92a. Une alternative aurait été d'utiliser les scénarios de la Conférence Mondiale de l'Energie et de l'IIASA, mais le scénario IS92a est utilisé dans la plupart des travaux scientifiques qui n'endogénéisent pas les émissions futures de référence. Nous modifions IS92a sur deux points. Premièrement, nous le linéarisons entre 1995 et 2100. Cela est justifié car la perturbation ainsi soustraite est faible, mais elle brouillait la clarté intuitive des résultats. Deuxièmement, nous étendons l'intervalle de définition de [1995, 2100] à [1765, 2300] comme indiqué sur la Figure 5.3 .

A partir de 1990, nous avons considéré que les émissions totales suivaient jusqu'à se stabiliser en 2100 une tendance linéaire approximant le scénario IPCC IS92a :

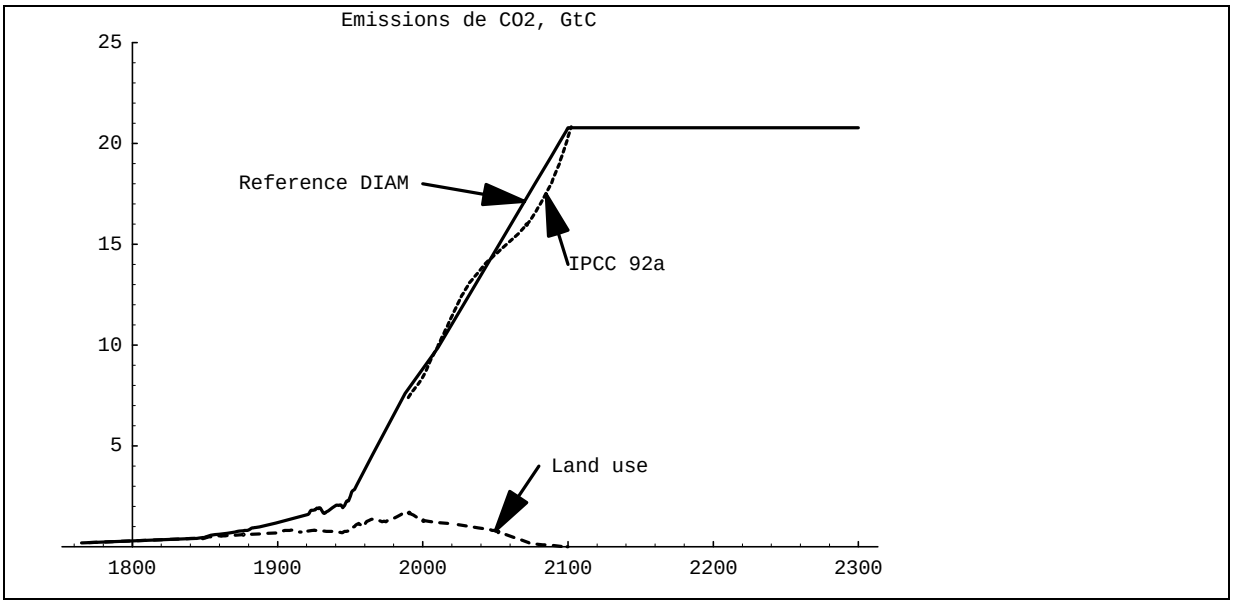
Equation 8 : $$E^{industrial}(t) + E^{landuse}(t) = 1.4 + 6.0\ (\ 1 + 2.0266/100\ (t - 1990)),\ \text{pour } 1990 \le t \le 2100$$

$$E^{industrial}(t) + E^{landuse}(t) = E^{industrial}(2100) = 20.8,\ \text{pour } t >= 2100$$

Nous avons pris $E^{landuse}(t)$ comme donné dans le scénario IPCC, pour en déduire les émissions industrielles de référence $E^{industrial}(t)$ par différence.

Figure 5.3 : Scénario d'émission de dioxyde de carbone de référence

Emissions totales en GtC, scénario linéaire approchant IPCC 92a. Les chiffres correspondant à la période [1990, t_0] sont des projections et non les observations, qui correspondent à un certain retard inévitable dans les données.



⇒ ***Fonction de réponse du cycle du carbone***

Le modèle du cycle du carbone est défini par la concentration préindustrielle $M_{preindustrial}$ et une fonction de réponse de l'atmosphère *R*. L'étude comparative menée par le GIEC[13] nous a permis de choisir la fonction correspondant au modèle de Wigley, représentée Figure 5.4 et discutée Encadré 5.1. Selon Hasselmann[14], le système pourrait rester à l'intérieur du domaine de validité de l'hypothèse linéaire pendant les prochains 100 à 150 ans.

Comme dans presque tous les modèles du cycle du carbone, on suppose que les émissions de carbone d'origine humaines se superposent à un cycle du carbone naturel équilibré. Cet équilibre est fixé de façon telle que les concentrations calculées par le modèle pour la date t_0 correspondent aux observations. Compte tenu de la fonction de réponse choisie et du profil d'émissions passées, il vient :

Equation 5.9 : $$M(1990) = 354.17 \Rightarrow M_{preindustrial} = 258.345$$

⇒ ***Date de stabilisation***

La trajectoire optimale d'émissions est relativement sensible à la date de stabilisation de la concentration, imposée dans le modèle. Il semble en effet réaliste de poser qu'on n'aborde pas de la même façon une stabilisation à échéance du milieu du XXIe siècle ou du suivant. C'est pourquoi nous examinerons deux dates, qui correspondent à deux scénarios différents. Dans le scénario central, le niveau de concentration final est atteint en 2050. Dans un scénario alternatif, il est atteint en 2150.

Equation 5.10 : $$t_{stab} = 2050$$

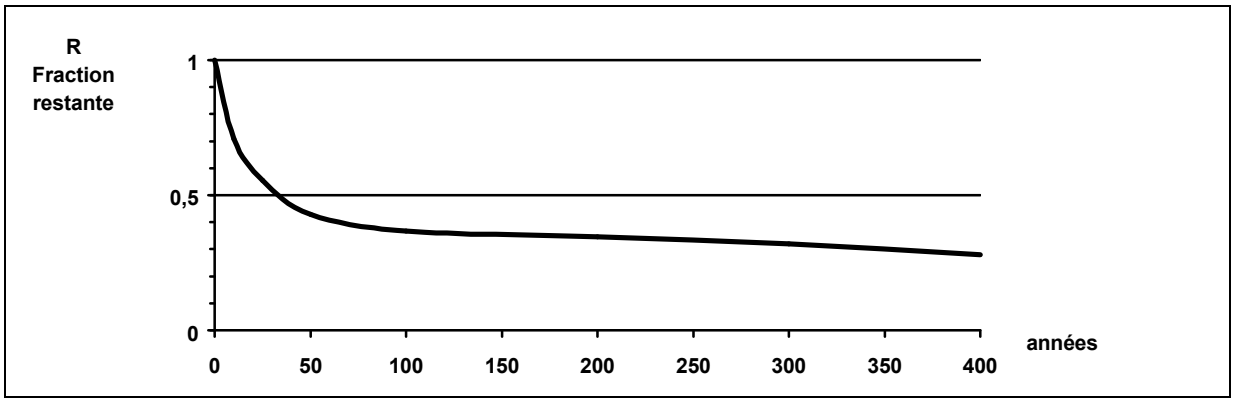


Figure 5.4 : Fonction de réponse atmosphérique utilisée.

Plusieurs approches pour définir *R* sont possibles. On peut d'abord envisager une exponentielle. Mais :

« The response curves illustrate (...) that the net climate response to CO_2 cannot be characterised by a single time constant. In all models, after a rapid temperature rise in the first few years as the upper mixed layer of the ocean warms, the net response function for the global mean temperature increase more slowly as the warming penetrates into the main ocean thermocline, reaching its maximum value of about 1°C-1.5°C after about a decade or two (compared with the asymptotic temperature response of 2.5°C for a CO_2 doubling without subsequent CO_2 losses from the atmosphere), after which the temperature gradually relaxes back over a period of several hundred years to its asymptotic equilibrium value of 2.5 * 7% = 1.175°C for models R00, R01 and R02 or 2.5 * 14% = 0.35°C for model R10. The initial fast response is governed by the temperature response of the ocean-atmosphere system, while the latter relaxation stages are determined by the slow response terms in both the carbon cycle and the climate system. » Hasselmann, Hasselmann, Gieering et al. (1996, p.16)

On peut alors examiner ce que les observations passées impliqueraient comme fonction de réponse. Il s'agit d'une déconvolution, qui se ramène à l'inversion d'une matrice triangulaire $m_{ij} = R_{i-j}$. Nous avons exploré cette approche, sans résultats convaincants. Rien ne contraignant la fonction trouvée à rester entre 0 et 1, nous trouvions *R* négatif pour le long terme. Or à long terme, la théorie montre que 7 à 14% du carbone émis n'est pas absorbée par les océans. Cette impasse s'explique peut être par les incertitudes dont les chiffres des émissions passées sont entachés, les erreurs numériques étant amplifiées lorsqu'on résout un problème inverse comme celui-ci.

C'est pourquoi nous fondons *R* sur les résultats des modèles géophysiques détaillés. Dans ce cadre, deux choix sont possibles selon que l'on considère une linéarisation au voisinage de l'équilibre préindustriel ou au voisinage du scénario de référence. Dans DIAM, le second s'impose, les Equation 5.3 et Equation 5.4 pouvant se réécrire sous une forme sans ambiguïté :

$$M(t) = M_{ref}(t) - \frac{1}{2.123}\left[\sum_{s=1765}^{t} R(s)\, x(t-s)\, E_{industrial}(t-s)\, ds - \tfrac{1}{2}\, x(t)\, E_{industrial}(t)\right]$$

avec un profil de concentration M_{ref} correspondant au scénario d'émissions de référence :

$$M_{ref}(t) = M_{preindustrial} + \frac{1}{2.123}\left[\sum_{s=1765}^{t} R(s)\,[E_{industrial}(t-s) + E_{landuse}(t-s)]\, ds - \tfrac{1}{2}\,[E_{industrial}(t) + E_{landuse}(t)]\right]$$

La fonction représentée Figure 5.4 correspond à :

t	0	10	25	50	100	200	400	535
R(t)	1	0.709	0.555	0.430	0.368	0.347	0.280	0.247

Encadré 5.1 : Choix de la fonction de réponse atmosphérique

3.2. Paramètres de la fonction d'impact

Une approche plus détaillée de la fonction de dommage *D* ferait intervenir deux modules. Un module climatique calculerait la variation du climat : températures, niveau de la mer, effets locaux, temporels, extrêmes et fréquentiels... Un module économique calculerait, en tenant compte de l'adaptation, l'impact de ces effets sur la richesse, ou sur le bien-être.

En première approximation, l'augmentation du forçage radiatif dépend logarithmiquement de la concentration[a]. La fonction d'impact de DIAM utilise un dommage marginal de la concentration constant, ce qui correspond donc un dommage de la température exponentiel. Toutefois, comme le rapport de la concentration sur son niveau préindustriel reste de l'ordre de 1.5 à 2.5, la non linéarité de la fonction logarithme joue en fait peu. Cette hypothèse est donc numériquement moins importante qu'elle pourrait sembler au premier abord.

Il est établi que la vitesse du changement climatique est un facteur d'impact très important en ce qui concerne les écosystèmes. Ne pas en tenir compte est une approximation difficile à justifier autrement que par l'absence de base empirique réelle et la pratique des modèles intégrés précédents comme DICE.

⇒ ***Retard changement climatique/concentration***

Le retard d_{lag} qui représente l'inertie du système climatique est fixée en référence aux travaux d'Hasselmann et alii cités précédement.

Equation 5.11 : $d_{lag} = 30$ ans

⇒ ***Zéro des dommages***

Les dommages climatiques *D* intervenant ici sont exprimés en tenant compte des possibilités d'adaptation des sociétés au nouvelles conditions. Nous supposons que les dommages observés à la date t_0 sont nuls :

Equation 5.12 : $M_{nodamage} = M(t_0 - d_{lag}) = 313.776$

⇒ ***Echelle des dommages***

La plupart des études sur le dommage climatique se réfèrent à une situation d'équilibre à concentration double de CO_2 - équivalent. Cela correspond environ à $M_{2x} = 486$ ppmv, ce qui est inférieur à 2*278 = 556 ppmv. Ce chiffre est obtenu par interpolation entre deux points estimés par le GIEC[15]. Une stabilisation à 450 ppmv (resp. 650) de CO2 correspondrait à un forçage radiatif de 484 ppmv (resp. 699), dans un scénario au cours duquel les autres gaz à effet de serre croissent linéairement jusqu'en 2100, puis se stabilisent.

Equation 5.13 : $M_{2x} = 486$ ppmv

Le dommage, incluant les effets non marchands est estimé à 1.5%-2% du PIB mondial[16]. Compte tenu de l'état actuel des connaissances, cette fourchette pourrait être regardée davantage comme un point focal de la discussion que comme un résultat scientifique. Dans le cas de base, nous avons considéré

[a] Par exemple, un modèle simple utilisé dans IPCC WGI (1997, technical paper I, annexe B) est :

$\Delta Q = 4.7 \frac{\ln(C/C_0)}{\ln(2)}$, où ΔQ représente le forçage radiatif additionnel dû à la concentration C de CO_2

le milieu de la fourchette :

Equation 5.14 : $d_{2x} = 1.75\ \%$

⇒ ***Effet croissance***

Comme on peut s'en apercevoir en comparant les coûts d'un typhon au Bangladesh et en Floride, les dommages environnementaux croissent avec la richesse. Toutefois, les économies plus riches sont peut être relativement moins vulnérables, elles peuvent s'adapter davantage. Dans l'absence d'information empirique sur le sujet, nous avons pris une valeur de croissance des dommages positive inférieure au taux de croissance économique à long terme, soit:

Equation 5.15 : $g_{damage} = 1\%$

3.3. Echelle de la fonction de coût de réduction

⇒ ***Actualisation***

Dans la situation dite de référence DIAM utilise un taux d'actualisation ρ égal à 4 %. La détermination du taux d'actualisation soulève de nombreux problèmes économiques et même éthiques qui sont, encore à l'heure actuelle, largement sujets à controverse[a]. Il faut également relever les deux points de vue possibles sur la grandeur des coûts envisagés. Ne s'élèvant qu'à quelques pour-cent de la consommation, on peut considérer que cela est relativement faible, certainement inférieur aux erreurs de mesure et de définition de la richesse, par exemple. Mais multipliés par la consommation mondiale, leur valeur absolue est énorme.

Equation 5.16 : $\rho = 4\%$

⇒ ***Taux de progrès technique autonome***

Dans la fonction de coût de réduction, le choix d'un taux de progrès technique autonome se base sur l'ordre de grandeur usuellement utilisé pour le taux d'amélioration autonome de l'efficacité énergétique (AEEI).

Equation 5.17 : $r_{autonome} = 1\%$

⇒ ***Principe du calibrage de c_a et de c_b***

A chaque date t, le coût de réduction des émissions polluantes dans DIAM est (rappel) :

Equation 5.6 : $$C(t) = \frac{1}{(1 + r_{autonome})^t} \frac{E^{industrial}(t)}{E^{industrial}(t_0)} [c_a\, x(t)^2 + c_b\, [x(t) - x(t\text{-}1)]^2].$$

[a] Si on fait l'hypothèse d'une fonction d'utilité logarithmique, le taux de préférence pure pour le présent peut s'exprimer comme la différence entre le taux d'actualisation ρ et le taux de croissance g . Dans un tel cadre, en supposant $g = 2.5\%$, le taux de préférence pure pour le présent utilisé par le modèle DIAM est de 1.5 %. Toutefois, la maximisation intertemporelle actualisée de l'utilité d'un agent représentatif n'est pas nécessairement le cadre le plus approprié pour discuter en théorie la solidarité intergénérationnelle et de développement durable.

Comme expliqué pages 137 et 142, quand on diminue c_a en laissant c_b constant, on diminue le coût de réduction des émissions et il en résulte trivialement une diminution des émissions optimales. Nous souhaitons éviter cet effet pour discuter la valeur relative de c_b et c_a , et non la valeur absolue des coûts de réduction. C'est pourquoi nous calibrons séparément le ratio c_b / c_a d'une part, et d'autre part l'échelle des coûts de réduction, en calibrant $\alpha\, c_a + \beta\, c_b$. Ces deux équations nous permettrons de déterminer les deux paramètres c_a et c_b .

⇒ *Echelle de la fonction de coût*

Nous fixons une fois pour toutes l'échelle des coûts de réduction par référence à un modèle reconnu : DICE.

Pour cela, on définit un chemin de référence correspondant à un programme de réduction des émissions augmentant de 1% par an pendant 90 ans, ce qui correspond à une stabilisation de la concentration vers 470 ppmv dans la seconde moitié du XXIe siècle et n'est pas très éloigné des chemins optimaux trouvés par DIAM dans le cas central.

Equation 5.18 :

$$x_{ref}(t) = t/100 \quad \text{jusqu'en } t_0 + 90,$$
$$x_{ref}(t) = 0.9 \quad \text{après}$$

Nous imposons alors que le coût C_{ref} de ce chemin de référence x_{ref} soit le même selon qu'il est calculé en utilisant la fonction de DICE ou bien celle de DIAM. Notons que dans la fonction de DICE, le taux d'actualisation est égal à ρ diminué du taux de croissance, soit 2%.

$$C_{ref} \text{ selon DICE}^{a} = \int_{t_0}^{t_n} e^{-2.678}\, e^{-(t-t_0)(\rho-0.02)}\, x_{ref}(t)^{2.89}\, dt = 13.73$$

$$C_{ref} \text{ selon DIAM} = \sum_{t=t_0}^{t_n-1} (1+\rho)^{-t}\, C(t)\, dt = 6.160\, c_a + 0.003518\, c_b$$

La condition qui fixe l'ordre de grandeur du coût dans DIAM est que ces deux coûts sont égaux. Cela signifie que pour le chemin de référence, le coût de réduction calculé avec la fonction de DIAM est égal à celui calculé avec la fonction de DICE. Au total, le système déterminant c_a et c_b est donc :

Equation 5.19 :

$$6.160\, c_a + 0.003518\, c_b = 13.73$$

⇒ *Inertie de la fonction de coût*

L'égalité précédente laisse ouverte le choix du ratio c_b / c_a . Puisque nous proposons d'examiner ce qui se passe lorsque ce ratio varie. il convient d'examiner empiriquement dans quelle plage il varie. Posons par définition :

Equation 5.20 :

$$\tau = c_b / c_a \Leftrightarrow \tau = \sqrt{\frac{c_b}{c_a}}$$

Dans la fonction de coût, $c_a\, x(t)^2$ et $c_b\, [x(t) - x(t-1)]^2$ ont les mêmes dimensions. La différence première $[x(t) - x(t-1)]$ est une approximation numérique pour la dérivée (dx/dt). Le rapport c_b / c_a a la même dimension que le rapport $(x)^2 / (dx/dt)^2$, c'est à dire qu'il est homogène au carré d'une durée.

[a] Notons qu'on utilise ici une intégrale qui se calcule exactement et non une somme numérique approchée.

Le paramètre τ apparaît donc comme une échelle de tempsfonction de coût: caractéristique de la fonction de coût de réduction. On peut l'interpréter concrètement comme la durée de demi-vie exponentielle du système énergétique global, ou encore comme la durée nécessaire pour stabiliser les émissions. Le coût permanent et le coût d'ajustement seront comparables si c_b est de l'ordre de $c_a\ \tau$, sinon l'un des deux termes sera négligeable devant l'autre.

Cette échelle de temps caractéristique τ peut être caractérisée empiriquement en analysant le système qui crée les coûts. L'expérience passée montre empiriquement que globalement, les nouvelles sources d'énergie mettent environ 50 ans pour atteindre un taux de pénétration de 1% à 50% de leur potentiel final[17]. Cela peut s'expliquer par l'importance des investissements à très long terme dans les systèmes énergétiques. En effet, la réforme des systèmes énergétiques porte sur des biens dont la durée de vie est comprise entre une quinzaine et une centaine d'années. La valeur inférieure correspond aux biens de consommation comme les automobiles, les équipements ménagers. La valeur supérieure se rapporte à la durée de vie des biens immobiliers, à la planification urbaine, à la durée de règne d'une source d'énergie. Une cinquantaine d'années correspond à une valeur médiane de la durée de vie du capital.

On peut ajouter au problème du renouvellement capital physique la durée nécessaire à la construction des institutions. Par institutions, nous entendons à la fois les institutions formelles, comme les mécanismes internationaux négociés par exemple, et les constructions sociales qui relèvent plus de la psychologie collective. La valeur $\tau_{welfare} = 50$ ans représente donc notre point de vue de référence quand à la structure temporelle de la fonction 'coût de réduction' dynamique.

Equation 5.21 : $$\tau = 50 \text{ ans}$$

En conclusion, notons qu'on pourrait remettre en question l'hypothèse de τ constant, en envisagenant que par la planification bien menée du développement d'un lot de technologies nouvelles et existantes, il serait possible de réduire l'inertie sans pour autant avoir à réduire les émissions elles-mêmes. Il s'agit de s'assurer du développement et donc de la disponibilité *future* des énergies propres. Une étude approfondie des conditions du progrès technologique induit, qui n'est pas représenté dans DIAM, serait nécessaire pour mieux éclairer cette question. Toutefois, le développement d'un marché pour les technologies non polluantes serait certainement de nature à stimuler l'intérêt pour la R&D dans ce domaine. En celà, des objectifs contraignants à court terme constituent un signal pourvu qu'ils aient un niveau de crédibilité suffisant.

Encadré 5.2 : Équations de DIAM en coût-bénéfice déterministe

Equation 5.2 : $$\underset{\boldsymbol{x}}{Min} \sum_{t=t_0}^{t_n-1} (1+\rho)^{-t} (D(t) + C(t))\, dt, \text{ pour } \boldsymbol{x} \text{ tel que } \forall\ t \geq t_{stab},\ M(t) = M(t+1)$$

Equation 5.3 : $$E(t) = E^{landuse}(t) + [1 - x(t)]\, E^{industrial}(t)$$

Equation 5.4 : $$M(t) = M_{preindustrial} + \frac{1}{2.123} \left[\sum_{s=1765}^{t} R(s)\, E(t-s) \quad - \quad \tfrac{1}{2} E(t) \right]$$

Equation 5.5 : $$D(t) = c_{2x} (1 + g_{damages})^t \frac{M(t - d_{lag}) - M_{nodamage}}{M_{2x} - M_{nodamage}}$$

Equation 5.6 : $$C(t) = \frac{1}{(1 + r_{autonome})^t} \frac{E^{industrial}(t)}{E^{industrial}(t_0)} [c_a\, x(t)^2 + c_b\, [x(t) - x(t-1)]^2]$$

Encadré 5.3 : Paramètres de DIAM en coût-bénéfice déterministe

Equation 7 :	$t_0 = 1997$ $t_n = 2300$
Equation 8 :	$E^{industrial}(t) + E^{landuse}(t) = 1.4 + 6.0\ (\ 1 + 2.0266/100\ (t - 1990))$, pour $1990 \leq t \leq 2100$ $E^{industrial}(t) + E^{landuse}(t) = E^{industrial}(2100) = 20.8$, pour $t >= 2100$
Equation 5.9 :	$M(\ 1990\ ) = 354.17 \Rightarrow M_{preindustrial} = 258.345$
Equation 5.10 :	$t_{stab} = 2050$
Equation 5.11 :	$d_{lag} = 30$ ans
Equation 5.12 :	$M_{nodamage} = M(t_0 - d_{lag}) = 313.776$
Equation 5.13 :	$M_{2x} = 486$ ppmv
Equation 5.14 :	$d_{2x} = 1.75$ %
Equation 5.15 :	$g_{damage} = 1\%$
Equation 5.16 :	$\rho = 4\%$
Equation 5.17 :	$r_{autonome} = 1\%$

Tableau 5.2 : Valeurs de c_a *et* c_b *pour les valeurs de* τ *étudiées.*

$\tau = \sqrt{\frac{c_b}{c_a}}$	5	20	50	500
c_a	4.18	1.81	0.918	0.02
c_b	104	726	2295	4980

4. Résultats et conclusions

4.1. Résultats

⇒ ***Hypothèses***

Dans le cas central, le taux d'actualisation est 4%, le dommage dû à un forçage radiatif double est 1.75% du PIB mondial et le coût de réduction est comparable à DICE, et la stabilisation de concentration est imposée en 2050. Nous comparons trois cas, différents par la durée caractéristique τ d'évolution du secteur énergétique.

Cas 1 : Le cas $\tau = 5$ ans, avec peu d'adaptation à long terme et peu d'inertie, comme dans la plupart des modèles jusqu'à présent. Dans cette perspective conventionnelle, les coûts permanents c_a sont relativement importants, et les coûts d'ajustement c_b sont relativement faibles.

Cas 2 : Le cas $\tau = 50$ ans, qui correspond à notre estimation centrale de la durée caractéristique des systèmes énergétiques.

Cas 3 : Le cas $\tau = 500$ ans, très inerte mais très adaptable à long terme.

Rappelons que dans ces trois cas, le coût total de réduction est comparable, seule la répartition entre les coûts permanents et les coûts d'ajustement varie.

⇒ ***Résultats dans le cas central***

Les résultats pour ces valeurs centrales sont illustrés Figure 5.5. Examinons d'abord les réductions en terme de pourcentage par rapport aux émissions de référence.

Dans le cas 1 classique peu adaptable/peu inerte, la réduction des émissions saute à un niveau optimal d'environ -6%, et reste ensuite à peu près constante à ce niveau. Ce résultat correspond, qualitativement et quantitativement à celui de Nordhaus[18]. Toutefois, la réduction s'amplifie brutalement dix ans avant la date de stabilisation imposée.

Les réductions optimales dans les cas 2 et 3 sont assez proches. Au départ, elles augmentent plus lentement que dans le cas 1. Mais le niveau de réduction du cas 1 est rattrapé au bout d'une quinzaine d'années, et la réduction augmente encore par la suite.

En ce qui concerne les profils optimaux d'émissions, la différence entre le cas conventionnel 1 et les deux autres cas est aussi très nette. Le profil correspondant au cas 1 suit une trajectoire parallèle au chemin de référence, avec un petit décrochement à la date initiale qui correspond, par exemple, au chemin de référence de CRPS[19]. Les sentiers optimaux dans les cas 2 et 3, plus inertes et plus adaptables à long terme, divergent progressivement de la trajectoire de référence, pour arriver à une stabilisation des émissions globales de CO_2 vers 2020. Dans ces cas, les coûts d'ajustement sont plus étalés dans le temps[a], au lieu d'être concentrés au début et à la fin des trajectoires[b].

---

[a] Mathématiquement, lorsque les coûts d'ajustement sont prépondérants, le problème est semblable à celui de la minimisation d'une somme $\sum_{t=1}^{t=N} a_t^2$ sous la contrainte $\sum_{t=1}^{t=N} a_t = A$, dans lequel le rôle des a_t est joué par le coût d'ajustement. Or la solution d'un tel problème de minimisation est que tous les a_t sont constant (et égaux à A/N).

[b] L'effet de concentration des ajustements au début et à la fin des trajectoires est classique dans les problèmes de maximisation intertemporel. Dans beaucoup de problèmes, la solution optimale est comparable à la solution d'un conducteur qui prend l'autoroute : d'abord il se rend à l'autoroute le plus rapidement possible, puis il suit l'autoroute, pour en sortir près de son but final. Au contraire, lorsque l'inertie est importante la solution est comparable au plan d'un randonneur qui prévoit un trajet de plusieurs jours : l'effort est réparti équitablement chaque jour.

En ce qui concerne les profils de concentration, les divergences sont moindres. Les trois cas correspondent à des niveaux optimaux de stabilisation dans la plage 450 ppmv - 490 ppmv. Dans le cas 1, moins adaptable à long terme, le niveau est plus élevé que dans le cas 3, le plus adaptable.

⇒ ***Résultats dans le cas où la contrainte de stabilisation est éloignée***

Les résultats dans le cas où la date de stabilisation est 2150 sont tracés sur la Figure 5.6. Les profils optimaux de concentration atteignent la stabilisation « par le haut », après être passés par un maximum. Ce résultat donne à penser que dans le cadre de l'analyse coût-bénéfice, la stabilisation des concentrations n'est pas un objectif optimal.

On retrouve encore les différences caractéristiques entre les trajectoires dans le cas conventionnel et les trajectoires dans le cas central : les réductions optimales sont plus rapides au début dans le cas 1, mais croissent ensuite plus lentement, et au final le niveau de concentration est plus élevé.

Le Tableau 5.4 montre divers indicateurs des trajectoires optimales illustrées plus haut. On note que différer les réductions jusqu'en 2020 diminue notablement le coût de réduction, abaissé de 16% à 29%. Il s'agit bien évidement d'un effet de l'actualisation. Au taux de 4%, une dépense de un franc en 1997 équivaut à quarante centimes en 2020. Différer les réductions de 20 ans augmente le coût total, puisque cela revient à ajouter une contrainte à la minimisation. Dans ces conditions, il est donc clair que dommage climatique augmente plus que le coût de réduction ne diminue.

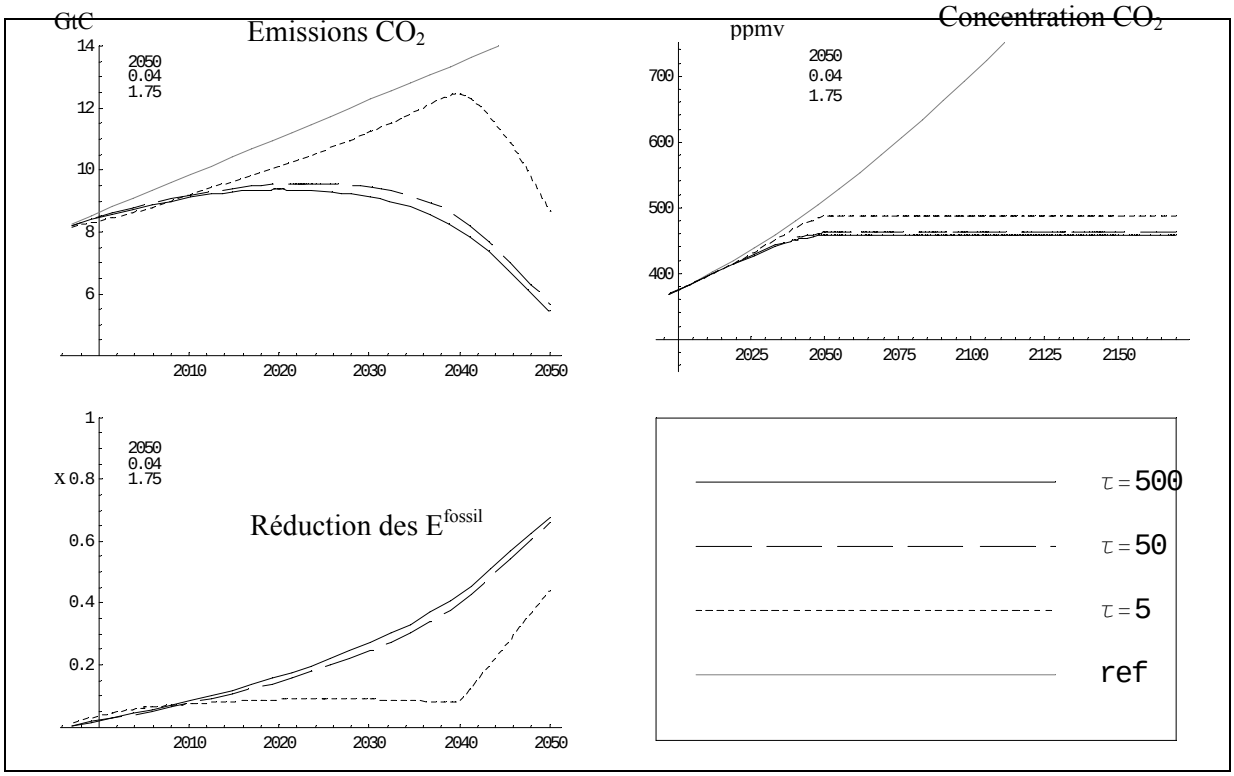


Figure 5.5 : Résultats de DIAM, cas central (stabilisation en 2050).

Profils temporels optimaux d'émissions, de concentration et de réduction d'émissions pour différentes valeurs de la durée caractéristique des systèmes énergétiques τ. Les émissions et leur réduction sont montrées sur 1990-2050, alors que les concentrations sur 1990-2175. Le cas $\tau = 5$ ans correspond à une situation très flexible à court terme, mais peu adaptable à long terme. Le cas $\tau = 500$ ans correspond à une grande inertie, et une grande adaptabilité. Le cas central est $\tau = 50$ ans. La date de stabilisation est fixée à 2050, le taux d'actualisation est 4%, le dommage climatique dû à un forçage radiatif double est 1.75% du PIB mondial et le coût de réduction est comparable à DICE.

τ	Niveau de stabilisation	Réduction optimale en 2020	Maximum des Emissions	Date du pic	% Coûts d'ajustement / coût total	Emissions cumulées jusque 2050	Variation du coût si début des réductions = 2020
5	488 ppmv	9%	12.5 GtC/yr	2040	6%	526 GtC	-5%
50	462 ppmv	15%	9.54 GtC/yr	2020	71%	451 GtC	+4%
500	459 ppmv	16%	9.37 GtC/yr	2020	100%	440 GtC	+11%

Tableau 5.3 : DIAM, résultats, cas central, stabilisation en 2050

Mêmes valeurs des paramètres que ci-dessus. Le niveau de stabilisation est calculé par le modèle. Le maximum des émissions et la date du pic correspondent aux coordonnées du sommet des courbes de concentration ci-dessus. Les émissions cumulées sont calculées depuis 1990 jusqu'à la date de stabilisation et ne concernent que les émissions fossiles. La variation du coût si le début des réduction est placé en 2020 au lieu de 1997 est calculé en examinant quelle est la trajectoire optimale sous la contrainte supplémentaire que les réductions $x(t)$ sont nulles pour $t \leq 2020$. Pour cette trajectoire, le coût total (réduction + impact) est évidement plus élevé, mais les deux composantes de ce coût peuvent avoir varié différemment.

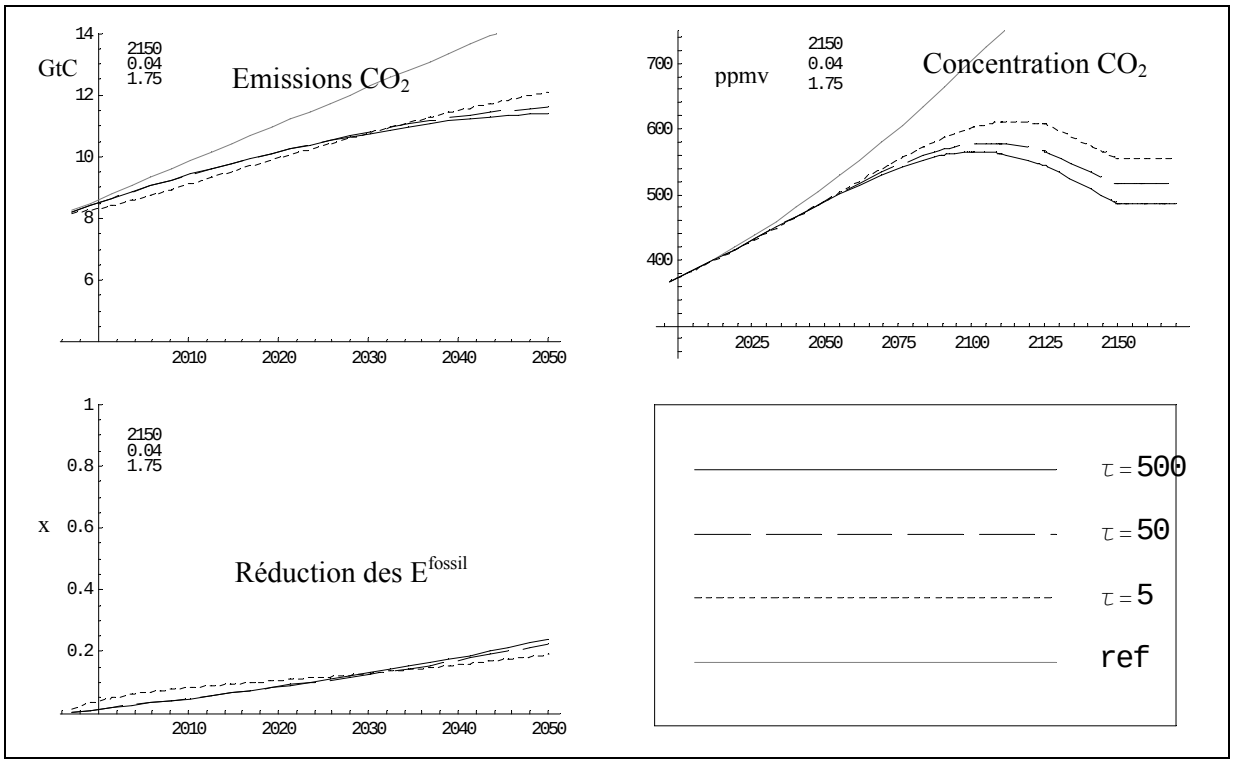


Figure 5.6 : Résultats de DIAM, stabilisation en 2150

Profils temporels optimaux d'émissions, de concentration et de réduction d'émissions pour différentes valeurs de la durée caractéristique des systèmes énergétiques τ. Les émissions et leur réduction sont montrées sur 1990-2050, alors que les concentrations sur 1990-2175. Le cas τ = 5 ans correspond à une situation très flexible à court terme, mais peu adaptable à long terme. Le cas τ = 500 ans correspond à une grande inertie, et une grande adaptabilité. Le cas central est τ = 50 ans.

La date de stabilisation est fixée à 2150, le taux d'actualisation est 4%, le dommage climatique dû à un forçage radiatif double est 1.75% du PIB mondial et le coût de réduction est comparable à DICE.

τ	Niveau de stabilisation	Réduction optimale en 2020	Maximum des Emissions	Date du pic	% Coûts d'ajustement / coût total	Emissions cumulées jusque 2150	Variation du coût si début des réductions = 2020
5	555 ppmv	11 %	12.5 GtC/yr	2070	3 %	1253 GtC	-16 %
50	516 ppmv	9 %	11.7 GtC/yr	2060	63 %	1079 GtC	-25 %
500	487 ppmv	9 %	11.4 GtC/yr	2050	99 %	965 GtC	-29 %

Tableau 5.4 : DIAM, résultats, stabilisation en 2150

Mêmes valeurs des paramètres que ci-dessus. Le niveau de stabilisation est calculé par le modèle. Le maximum des émissions et la date du pic correspondent aux coordonnées du sommet des courbes de concentration ci-dessus. Les émissions cumulées sont calculées depuis 1990 jusqu'à la date de stabilisation et ne concernent que les émissions fossiles. Le chiffre 1253 est comparable aux résultats des modèles plus détaillés. Pour les chemins stabilisant la concentration à 550ppmv en 2150, la fourchette d'émissions cumulées est 1 050 GtC - 1 320 GtC (Enting et al., 1994, p. 32). Nous avons procédé à d'autres simulations, qui vérifient le fait que le résultat obtenu par le modèle du cycle du carbone linéaire inclus dans DIAM est à l'intérieur des plages définies par le GIEC (voir annexe).

⇒ *Sensibilité au taux d'actualisation*

Le Figure 5.7 montre la sensibilité des sentiers optimaux de réduction par rapport au taux d'actualisation ρ. La colonne de gauche correspond à ρ = 3%, celle du centre à ρ = 4%, et celle de droite à ρ = 5%.

La première ligne de 3 graphiques montre les sentiers optimaux d'émission qui stabilisent la concentration en 2050. On voit que augmenter le taux d'actualisation, c'est reporter dans le futur l'effort de réduction. Toutefois, cela n'annule pas les différences qualitatives entre les trajectoires correspondant au cas 1 conventionnel (faible inertie et adaptabilité), par rapport aux deux autres. En ce qui concerne les concentrations, la troisième ligne montre que lorsque la stabilisation est imposée en 2050, alors le taux d'actualisation joue peu.

Au contraire, les trois graphiques de la quatrième ligne (celle du bas) sont très différents. Ce cas correspond à une date de stabilisation éloignée, 2150, le niveau final de concentration pouvant être atteint par le haut. Dans ces conditions, la trajectoire optimale est surtout déterminée par la comparaison des coûts et des bénéfices économiques, et non plus par la contrainte environnementale. On comprend alors que le taux d'actualisation a un effet très important.

⇒ *Sensibilité à l'importance des impacts climatiques*

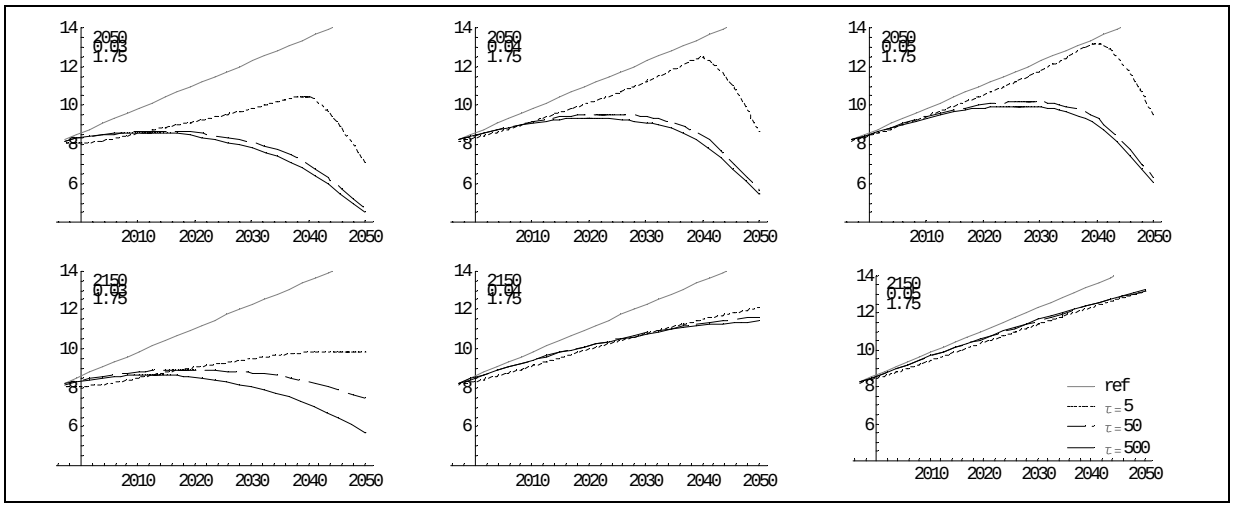
Le Tableau 5.5 montre la sensibilité des résultats par rapport au paramètre c_{2x} de la fonction de dommages, qui détermine l'impact d'un doublement ce la concentration de CO_2 équivalent. La plage étudiée est celle citée par le GIEC, soit de 1,5% à 2% du PIB mondial.

Ces chiffres confirment notre analyse de l'importance du paramètre d'inertie τ. Cela peut se comprendre puisque la part des coûts d'ajustements dans les coûts totaux apparaît relativement indépendante de c_{2x}. On retrouve deux configurations principales:

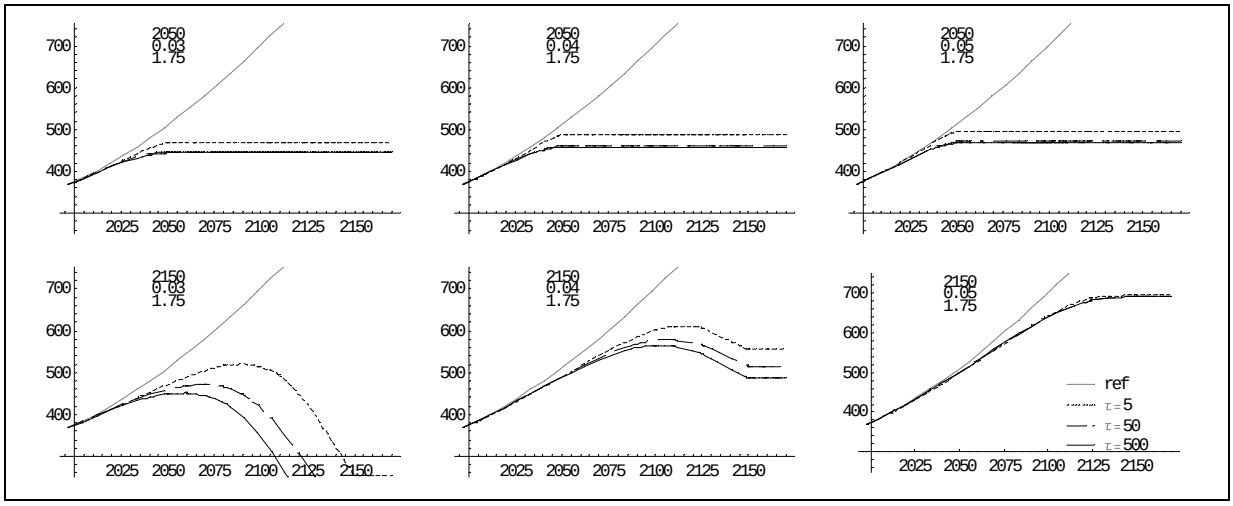
Lorsqu'on impose une stabilisation à échéance 2050 et que l'inertie est supérieure ou égale à 50 ans (2e et 3e lignes du tableau du haut). Le coût du délai (attendre 2020 pour commencer à réduire les émissions) est positif dans ce cas. Les réductions optimales en 2020 sont importantes, entre 14% et 17%, et le niveau de stabilisation est autour de 460ppmv. Les résultats sont peu sensibles à c_{2x} . Cela montre que dans ce cas, l'analyse coût bénéfice joue en fait peu. Il s'agit plutôt d'une situation dans laquelle on cherche à minimiser les coûts étant donné une contrainte environnementale forte.

Lorsqu'on impose une date de stabilisation éloignée, 2150. Dans ce cas, le niveau optimal de stabilisation de la concentration est sensible à c_{2x} : il diminue de 100ppmv environ lorsque la magnitude des dommages passe de 1.5% à 2% du PIB. Le niveau de réduction optimal à court terme est aussi sensible à c_{2x} , puisqu'il augmente de 3% à 4% entre la valeur basse et la valeur haute des dommages. Dans le cas d'une date de stabilisation éloignée, les résultats découlent bien de la comparaison coûts-bénéfices de la modération du changement climatique.

Les résultats pour $\tau = 5$ et $t_{stab} = 2050$ se rattachent à cette seconde configuration, sans que le niveau de stabilisation soit aussi sensible à c_{2x} car la date de stabilisation ne permet pas beaucoup de flexibilité.



Trajectoires optimales d'émission



Trajectoires optimales de concentration

Figure 5.7 : DIAM, Sensibilité au taux d'actualisation

Trajectoires optimales d'émission de CO_2 pour un taux d'actualisation r = 3% (colonne de gauche), 4% (au centre), et 5% (à droite). La rangée du haut correspond à la stabilisation en 2050, celle du bas à la stabilisation en 2150. Les autres paramètres prennent les valeurs centrales. Même disposition que ci-dessus pour les trajectoires optimales de concentration..

Tableau 5.5 : DIAM, sensibilité aux dommages climatiques

Stabilisation des concentrations en 2050.

τ	c_{2x}	Niveau de stabilisation	Réduction optimale en 2020	Maximum des émissions	Date du maximum	% coûts d'ajustement/ total	Emissions cumulées jusque 2050	Impact sur le coût de réduction d'attendre 2020
5yr	1.5	491ppm	7%	12.8	2040	6%	536GtC	-4%
5yr	1.75	488ppm	9%	12.5	2040	6%	526GtC	-5%
5yr	2.	485ppm	11%	12.1	2040	6%	516GtC	-7%
50yr	1.5	463ppm	14%	9.64	2025	71%	455GtC	4%
50yr	1.75	462ppm	15%	9.54	2020	71%	451GtC	4%
50yr	2.	461ppm	16%	9.46	2020	71%	446GtC	3%
500yr	1.5	460ppm	16%	9.44	2020	100%	443GtC	12%
500yr	1.75	459ppm	16%	9.37	2020	100%	440GtC	11%
500yr	2.	458ppm	17%	9.3	2020	100%	437GtC	10%

Stabilisation des concentrations en 2150.

τ	c_{2x}	Niveau de stabilisation	Réduction optimale en 2020	Maximum des émissions	Date du maximum	% coûts d'ajustement/ total	Emissions cumulées jusque 2050	Impact sur le coût de réduction d'attendre 2020
5yr	1.5	604ppm	9%	13.3	2070	3%	1434GtC	-16%
5yr	1.75	555ppm	11%	12.7	2070	3%	1253GtC	-16%
5yr	2.	505ppm	12%	12.1	2070	3%	1072GtC	-16%
50yr	1.5	568ppm	7%	12.3	2060	63%	1276GtC	-25%
50yr	1.75	516ppm	9%	11.7	2060	63%	1079GtC	-25%
50yr	2.	464ppm	10%	11.2	2050	63%	882GtC	-25%
500yr	1.5	542ppm	7%	12.	2060	99%	1175GtC	-29%
500yr	1.75	487ppm	9%	11.4	2050	99%	965GtC	-29%
500yr	2.	432ppm	10%	10.9	2050	99%	755GtC	-29%

4.2. Discussion

⇒ ***Perspectives à long terme***

A long terme, nos résultats illustrent deux lectures de la Convention Climat, dont l'objectif affiché est de stabiliser les concentrations à un niveau sans danger. Etudier la stabilisation dans un délai de 50 ans relève d'une lecture plutôt littérale. Etudier la stabilisation dans un délai de 150 ans interprète le texte plus largement. Notons que l'interprétation large n'est pas incompatible avec l'esprit du processus. Celui ci consiste bien à négocier des protocoles d'application de plus en plus rigoureux. Le plafond de concentration mentionné dans la convention n'est pas spécifié. Rien n'exclut donc que ce plafond évolue à la baisse avec les protocoles successifs d'application de la convention.

- Lorsque l'on envisage une stabilisation de la concentration au milieu du siècle prochain, le résultat optimal à long terme, c'est à dire le niveau de stabilisation de la concentration de dioxyde de carbone, est principalement conditionné par l'irréversibilité physique. Sauf à imaginer des puits artificiels de carbone, la concentration augmente régulièrement tant que la pollution n'est pas significativement réduite. Au siècle prochain, la date de stabilisation est donc la variable la plus importante qui commande le niveau atteint.
- Si on envisage une stabilisation des concentrations à plus long terme, alors l'analyse coût-bénéfice redevient déterminante dans le choix du palier de concentration. Mais dans ce cas, la notion même de palier de concentration perd de son intérêt. L'analyse coût-bénéfice revient au premier plan, et il n'y a pas de raison a priori pour qu'une concentration constante constitue l'objectif le plus efficace. En pratique, le cas de la stabilisation à long terme, où le palier serait atteint par le dessus, semble donc difficile à justifier. La contrainte de stabilisation peut être vue surtout comme une condition finale du modèle, qui coïncide arbitrairement avec l'objectif de la Convention Climat. Cette condition finale est nécessaire d'un point de vue technique afin d'éviter les effets d'horizon dans le modèle. Mais on aurait aussi bien pu étudier le cas où on impose une décroissance exponentielle de la concentration à partir de la date 2150.

La version de DIAM présentée ci-dessus propose surtout une analyse des chemins de transition. Le modèle n'est pas conçu pour étudier la question du niveau optimal de stabilisation M_{stab}. Bien que ce niveau soit calculé par le modèle, il dépend directement de la date de stabilisation qui est, elle, exogène. Avec la formulation actuelle, nous avons observé que repousser la date de stabilisation tendait toujours à diminuer les coûts totaux. Cela peut se comprendre mathématiquement puisque cela revient à lever successivement des contraintes dans un programme d'optimisation. Economiquement, repousser la date de stabilisation permet de gagner en coût de réduction lorsque l'on passe de 2050 à 2060, par exemple. A plus long terme, lorsque l'on passe de 2150 à 2160, on gagne surtout en dommages climatiques évités, puisque cela permet une stabilisation à un niveau plus bas[a].

La fixation d'un plafond de concentration, si elle est rationnelle, relève essentiellement d'une attitude de précaution. Elle est donc gouvernée par les incertitudes et les préférences face au risque, ainsi que la solidarité intergénérationnelle. L'évaluation du risque du changement climatique, et aussi l'évaluation des impacts non marchands prennent une importance certaine dans ce choix. Aucun de ces aspects n'est représenté à ce stade dans le modèle. Dans le chapitre suivant, nous proposerons une façon de prendre explicitement en compte l'incertitude et la précaution.

En ce qui concerne les perspectives à très long terme, nous n'apporterons donc pas de quantifications d'un niveau optimal de stabilisation. Notre travail souligne toutefois trois points intéressants.

1. Il est à peu près équivalent de porter la discussion sur le niveau ou sur la date de stabilisation de la concentration.

[a] A la limite, rien dans le modèle n'interdit les émissions et les concentrations négatives. Cela ne se produit pas avec les ordres de grandeur des paramètres utilisés ici.

2. Dans un modèle, la stabilisation est un objectif compréhensible si on l'envisage à terme de quelques décennies, mais dans le long terme on pourrait plutôt envisager sur une trajectoire de concentration qui tend vers l'équilibre préindustriel.
3. Les résultats montrent tous que lorsque la part des coûts d'ajustement augmente, le niveau optimal de stabilisation à long terme diminue. Dans la mesure où certains modèles auraient pu sous estimer l'inertie du système socio-énergétique, ils auraient donc également sous estimé les réductions optimales à long terme.

⇒ *Déterminants de la forme de la trajectoire*

La déformation des chemins optimaux de transition lorsque τ augmente peut être expliquée par la combinaison de trois facteurs que le modèle met en évidence :

1. Le début de la trajectoire est marqué par l'effet initial de l'inertie, qui tend à augmenter les émissions optimales à court terme. L'inertie s'oppose directement à une déviation rapide par rapport à la trajectoire de référence. Lorsqu'il y a peu d'inertie, la trajectoire optimale d'émission tend marquer un décrochement juste après à la date initiale du modèle, comme dans DICE. Lorsque l'inertie est importante, au contraire, la réduction optimale augmente lentement au départ.
2. Au milieu, le niveau d'émission maximal tend à diminuer à cause de l'effet réparti de l'inertie. Lorsque les coûts d'ajustement augmentent, la courbure maximale de la trajectoire optimale diminue. Cela revient à adoucir le pic au voisinage du maximum d'émissions, pendant la période où les coûts d'ajustement sont importants. Lorsque les coûts d'ajustement dans les systèmes énergétiques sont importants, on a intérêt à commencer à modérer les émissions longtemps avant la date prévue de stabilisation, afin les étaler dans le temps.
3. A long terme, l'adaptabilité du système augmente lorsque c_a diminue. Cela modifie immédiatement l'équilibre entre les coûts permanents et les dommages permanents. Le niveau optimal de concentration à long terme diminue donc. L'adaptabilité pourrait aussi influer de façon exogène, puisque le choix de la date de stabilisation se réfère, informellement, à une comparaison des coûts et des bénéfices, mais cela n'est pas représenté ici.

L'importance relative de chacun des trois effets varie en fonction des hypothèses. L'effet réparti de l'inertie est sans doute le facteur le plus important lorsque la date de stabilisation est 2050. Dans l'autre cas, 2150, la différence entre les trois trajectoires étudiées est sans doute davantage due à l'adaptabilité à long terme.

Ces trois effets se composent sans qu'il y ait de frontière nette entre début, milieu et fin de trajectoire. Il serait possible d'approximer la forme des trajectoires optimales d'émissions en raccordant un segment linéaire, une portion de parabole, puis une exponentielle décroissante. Bien que ce résultat puisse sembler naturel, il n'est pas trivial car il ne se retrouve pas dans tous les modèles existants.

⇒ *Perspectives à court terme*

A court terme, c'est à dire en 2020, les réductions optimales varient entre 9% et 16% dans le cas central. Un problème d'interprétation se pose : comment qualifier ces chiffres de négligeables, modestes, significatifs ou sensibles ? Les réductions globales doivent être multipliées pour obtenir l'effort supporté par les pays de l'OCDE seuls. Une réduction globale de 5% correspond à une augmentation des émissions de l'OCDE en 2020 de 4% par rapport au niveau de 1990. Cela peut être qualifié de modeste. Une diminution globale de 15% correspond à une baisse dans l'OCDE de 32% par rapport à 1990. Dans la mesure où aujourd'hui, en 1996, le retour au niveau de 1990 n'est pas encore atteint, nous pouvons qualifier ce chiffre de sensible. Nous dirons qu'une diminution de 10% sera significative, ce qui pour nous est intermédiaire entre les deux qualificatifs.

Dans le cas central il est optimum de réduire très significativement les émissions: -15% en 2020 par rapport à IS92a. Cela parce que la date de stabilisation est 2050, et la durée optimale de réforme du système est 50 ans. Le plafond de concentration est alors inférieur à 500 ppmv. Toutefois, l'effort à

court terme est notablement diminué, 9% seulement, si l'inertie du système est estimée à 5 ans.

Au contraire, si la date de stabilisation est 2150, c'est alors l'effet initial de l'inertie qui prédomine. La réduction optimale passe de 9% à 11% lorsque l'inertie diminue de 50 à 5 ans. On constate peu de différences à court terme entre l'hypothèse centrale $\tau = 50$ ans et l'hypothèse inerte-adaptable $\tau = 500$ ans.

Les résultats laissent à penser que l'effet initial de l'inertie est relativement rapidement effacé par l'effet réparti. On constate en effet que la trajectoire correspondant à $\tau = 50$ recoupe celle avec $\tau = 5$ à des dates relativement peu éloignées par rapport à la date de stabilisation, soit 2010 pour $t_{stab} = 2050$, et 2030 pour $_{tstab} = 2150$.

4.3. Conclusions

Métaphoriquement (voir Figure 5.8), on pourrait comparer les résultats de beaucoup de modèles actuels à une stratégie de lièvre. Comme on croit que l'on peut aller très vite, la stratégie optimale est de partir à fond, passer l'essentiel du chemin sans effort, et tout rattraper à la fin. Dans ce chapitre, nous avons soulevé le problème de savoir si, compte tenu de la grande inertie socio-économique, une stratégie de tortue ne serait pas plus indiquée.

Ce résultat est d'autant plus pertinent que les mécanismes internationaux mis en place pour traiter le problème du changement climatique ont aussi une grande inertie, qui s'ajoute aux aspects purements techniques et industriels du problème. Cet aspect institutionnel peut s'illustrer par cet interview d'un conseiller de Clinton[20], qui montre que la durée caractéristique des actions concertées à l'échelle mondiale se mesure aussi en décennies.:

> *Practically speaking, when you look at the year 2005, it is impossible to achieve 15 to 20 percent reductions in that time period. We won't even have a framework until 1998. Then, we need to try to ratify that agreement, which could be at least another year, maybe two. Then we need to pass implementing regulations, which could be another year, maybe two. All of a sudden, it's at least 2004, and it's a little hard to believe that in 12 months' time, you can achieve a 20 percent reduction in emissions.*

Dans ce chapitre, nous avons montré sur un modèle empirique simple l'importance de l'inertie et de l'adaptabilité des systèmes énergétiques dans la discussion sur les réponses au changement global. L'inertie a deux effets. L'effet direct est de rendre plus coûteuse toute déviation rapide par rapport à la trajectoire de référence. Comme celle ci est croissante, cela implique des émissions plus élevées. L'autre conséquence de l'inertie est l'effet réparti. Plus la durée optimale de réforme est longue, plus il faut la commencer tôt. Cela implique que l'on puisse aller moins haut sur le chemin de référence, et donc que les émissions cumulées soient moindres. De plus, l'adaptabilité des systèmes énergétiques conduit à de plus faibles coûts permanents de dépollution à long terme. Cela implique un plus faible niveau stabilisé de pollution.

Nos résultats conduisent à donner une explication élémentaire, illustrée Figure 5.9, du calcul d'un

Figure 5.8 : Le Lièvre et la Tortue.

Source : illustration Gustave Doré.

chemin optimal d'émission. En première approximation, les réductions optimales sont celles qui répartissent dans le temps les coûts d'ajustement, ce qui implique une vitesse de réduction des émissions constante. Pour savoir à quelle date il convient de faire démarrer les politiques de modération de l'effet de serre, il suffit de comparer la durée de réforme du système avec la durée restante avant que l'on franchisse le seuil de dangers.

Différentes lectures sont alors possibles. On pourrait par exemple considérer que la durée de 50 ans compte 10 ans de réforme des institutions, 20 ans de réformes dans les pays de l'OCDE et 20 ans de diffusion dans les autres pays. L'objectif affiché de 450ppmv est réaliste, puisque le processus de coordination internationale est déjà lancé. Si on suppose une inertie inférieure, on dispose encore de temps pour préparer les réformes, mais réciproquement un autre point de vue pourrait considérer que le seuil de 450 ppmv est déjà trop strict.

Ce chapitre montre la nécessité d'introduire dans l'analyse, la notion de coût d'ajustement, aujourd'hui quasiment absente du second rapport du GIEC, et de progrès technique induit, encore très peu représenté dans les modèles. La comparaison des coûts et des bénéfices ne peut ignorer la dynamique du coût de réduction.

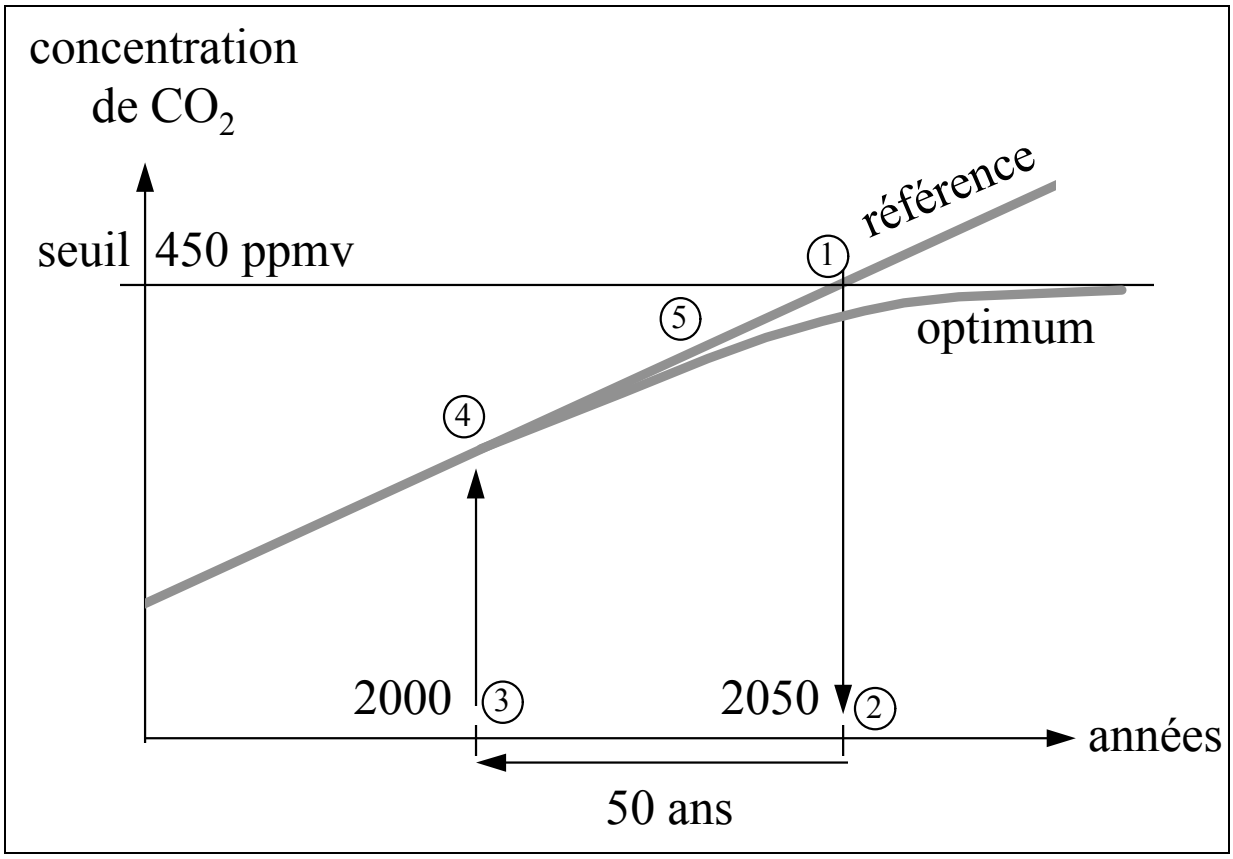


Figure 5.9 : Calcul simplifié de la date butoir.

Cette figure synthétise comment se détermine le chemin optimal à partir de trois éléments : Le chemin de référence, le seuil à ne pas dépasser, et la durée de réforme du système. On définit la date butoir ① projeté en ② - ici 2050, comme celle où le chemin de référence dépasserait le seuil, ici 500 ppm. Il est optimal de lancer la réforme au dernier moment ③, pour que son achèvement coïncide avec la date butoir. Le début d'action optimal est donc en ④. En concentration, les effets sont sensibles en ⑤, plusieurs décennies après le début de l'action.

Références bibliographiques

[1] Michael J. Grubb, Thierry Chapuis, Minh Ha Duong, *Optimizing climate change abatement responses: On Inertia and Induced Technology Development*, in N. Nakicenovic, W. D. Nordhaus, R. Richels et F. Toth eds, Integrative Assessement of Mitigation, Impacts, and Adaptation to Climate Change, IIASA CP-94-009,

Références bibliographiques

Laxenburg, Austria, 13-15 octobre 1993.

[2] Thierry Chapuis, Minh Ha Duong et Michael J.Grubb, *The Issue of Inertia and Adaptability in Integrated Assessment: An Analysis Using DIAM*, in Chen R., Tuttle D., Linville C. (eds), NATO Advanced Reseach Workshop, Integrated Assessment of Global Environmental Change: Science and Policy, Duke University, NC, USA, October 1995.

[3] Minh Ha Duong et Thierry Chapuis, *DIAM: Un Modèle Dynamique pour Etudier l'Inertie et l'Adaptabilité dans le Problème de l'Effet de Serre*, Tendances Nouvelles en Modélisation pour l'Environnement, Actes des Journées du Programme Environnement, Vie et Sociétés du CNRS, pages 36-41, Paris, 15-17 janvier 1996.

[4] Michael J. Grubb, Thierry Chapuis et Minh Ha-Duong, *The economics of changing course. Implications of adaptability and inertia for optimal climate policy*, Energy Policy 23 (4/5) 417-432, avril/mai 1995. Résumé disponible en ligne à http://sedac.ciesin.org/mva/iamcc.tg/articles/EP-abstracts/epgrubb.html, accédé 19/12/97.

[5] GIEC WGI, *Second Assessment Report*, Document Technique III, p. 4, 1996.

[6] World Energy Council, *Energy for Tomorrow's World - The Realities, the Real Options and the Agenda for the Achievements*, p.172, scénario B, Kogan Page, London, 1993.

[7] GIEC, *Suplementary report*, p. 91, scénario IS92a, 1992.

[8] H. Oeschger et M. Heimann, *Uncertainties of predictions of future atmospheric CO2 concentrations*, Journal of Geophysical Research, 88 C (2), 1258-1262, février 1983.

[9] Ian G. Enting, *Analysing the conflicting requirements of the framework convention on climate change*, Climatic Change, 31, 5-18, 1995.

[10] Klaus Hasselmann, Susanne Hasselmann, Ralf Giering, Victor Ocana et Hans von Storch, *Optimisation of CO2 emissions using coupled integral climate response and simplified cost models. A sensitivity study.*, p. 15., Max-Plank-Intitut fur Meteorologie in Hamburg technical report n°192, mars 1996.

[11] Michael J. Grubb, Thierry Chapuis et Minh Ha-Duong, *op. cit.*, 1995.

[12] Eric Haites, *communication orale*, IIASA workshop on Integrative Assessement of Mitigation, Impacts, and Adaptation to Climate Change, Laxenburg, Austria, 15 octobre 1993.

[13] Ian G. Enting, Tom M. L. Wigley, et M. Heimann, *Future Emissions and Concentrations of Carbon Dioxide: Key Ocean / Atmosphere / Land Analyses,* Division of Atmospheric Research Technical Paper n° 31, chapitre 9, CSIRO, Australia 1994.

[14] Klaus Hasselmann, Susanne Hasselmann, Ralf Giering, Victor Ocana et Hans von Storch, *op. cit.* , p. 22, 1996.

[15] GIEC, *Technical paper 2*, ch. 4.3 fig. 11, 1996.

[16] GIEC Working Group III, *Technical Summary ch.6*, 1996.

[17] J. Andere, W. Haefele, N. Nakicenovic et A. McDonald, *Energy in a Finite World*, Ballinger, Cambridge MA, 1981.

[18] William D. Nordhaus, *Managing the Global Commons, The Economics of Climate Change*, MIT Press, Cambridge, MA, p. 93, 1994.

[19] James K. Hammitt, Robert J. Lempert et Michael E. Schlesinger, *A sequential decision strategy for abating climate change*, Nature, 357; 315-318, 1992.

[20] McGinty, *Environment*, *Bulletin of the United States Information Service*, Embassy of the United States, 4, 10 juillet 1997

Chapitre 6. Décision séquentielle et timing des réductions

La Convention Climat fournit un cadre général de négociation pour réduire les émissions des gaz à effet de serre, mais aucun objectif quantifié : son but ultime est de stabiliser les concentrations à « *un niveau qui prévient les interférences dangereuses avec le système climatique* ». La signant en 1992, les pays riches avaient pour la plupart annoncé leur intention de réduire ou stabiliser leurs émissions à l'horizon 2000.

Or, en 1997, peu de politiques spécifiques ont été engagées pour arriver à ce but. En effet, si les changements nécessaires pour créer une économie peu émettrice induiront de nombreuses opportunités pour ceux qui sauront en tirer profit, il y aura aussi des perdants. Bien que la restriction des l'usage de combustibles fossiles pour la production d'énergie n'exclue pas d'autres utilisations de ces minerais qui incorporeraient plus de valeur ajoutée, on conçoit que certains groupes de pression freinent l'instauration de telles institutions, risquant de considérablement dévaloriser la rente pétrolière et charbonnière.

De plus, un problème de coordination internationale se pose : aucun pays ni groupe de pays n'a intérêt à agir de façon isolée. Et même si un pays croit que les autres vont agir, à court terme il serait encore plus intéressant d'attendre que de se joindre à l'action. Bien qu'à moyen terme la nécessité d'être intégré à l'économie mondiale rende la coopération nécessaire, au moins pour de petits pays, ce problème du passager clandestin paralyse toute action isolée.

Mais à la différence du dilemme du prisonnier, la question se pose dans l'incertitude et de manière récurrente à une collectivité capable d'apprentissage. La négociation continue, la Conférence des Parties se réunissant régulièrement afin d'aboutir à un protocole facilitant une coopération effective. Dans ce contexte, les résultats scientifiques tendant à montrer l'urgence d'agir ou au contraire l'opportunité d'attendre avant de réduire les émissions de CO_2 ne manquent pas d'apporter des éléments directs à la réflexion des décideurs.

Dans ce chapitre, largement basé[1] un texte publié dans Nature à l'occasion de la conférence de Kyoto, nous examinons jusqu'à quel point l'incertitude implique une stratégie de précaution, c'est à dire des réductions sensibles des émissions de gaz à effet de serre à court terme. Le chapitre est organisé en trois paragraphes. Le premier rappelle la problématique et l'historique de la question du timing des réductions. Le second analyse le problème des chemins optimaux de réduction pour atteindre un plafond de concentration donné, déterministe ou aléatoire. Le troisième paragraphe examine dans quelle mesure les résultats obtenus au second restent vrais dans un cadre coût-bénéfice.

1. La question du timing des réductions

1.1. La controverse sur le timing

Le débat sur le timing des réductions a été marqué par Wigley, Richels et Edmonds[2], qui ont attiré l'attention sur les gains économiques d'un report de l'effort de réduction des émissions pour quelques décennies. Reporter l'action au moins jusqu'à l'an 2000 n'exclurait pas physiquement de stabiliser la concentration de CO_2. Les gains associés sont illustrés par le Tableau 6.1. Celui ci montre que le surcoût si on commence à agir en 1990 au lieu d'attendre 2010 atteint 50%. L'apport des auteurs peut être analysé en deux temps.

⇒ *Le passage des courbes aux corridors*

Dans un premier temps, les auteurs ont élargit les débats en séparant le court du long terme. Leurs travaux arrivent à une date où le groupe de travail I du GIEC (WGI) vient de définir un jeu de profils temporels d'émission pour atteindre divers plafonds de concentration de CO_2 . Or, partant sur des considérations purement physiques, le WGI aboutit à des profils temporels dans lesquels les émissions dévient immédiatement du scénario de référence.

Toujours sur des bases géophysiques, mais cette fois guidés peut être par des intuitions économiques, Wigley, Richels et Edmonds[4] ont pu définir un second jeu de profils temporels, stabilisant aussi la concentration à long terme mais suivant le scénario de référence au moins jusqu'en l'an 2000.

Le second rapport du GIEC accorde un poids égal aux profils WGI et WRE représentés Figure 6.1. Comme expliqué chapitre 3, on peut considérer que ces profils déterminent des sortes de 'corridor' permettant de stabiliser la concentration de CO_2 à long terme.

⇒ *Le positionnement dans le corridor*

Dans un second temps, les auteurs ont suggéré que le haut du corridor était probablement moins éloigné de la trajectoire optimale que le bas. C'est ce second temps que nous allons discuter dans ce chapitre, en examinant quantitativement comment la trajectoire optimale s'éloigne de la référence.

Nous avons assez longuement évoqué au chapitre 5 l'inertie du capital en place et celle des systèmes énergétiques en général. A cet égard, il apparaît intuitif que le bas du corridor, étant marqué par une déviation brusque hors du chemin de référence, ne constitue sans doute pas une transition très efficace vers une économie moins dépendante des énergies fossiles.

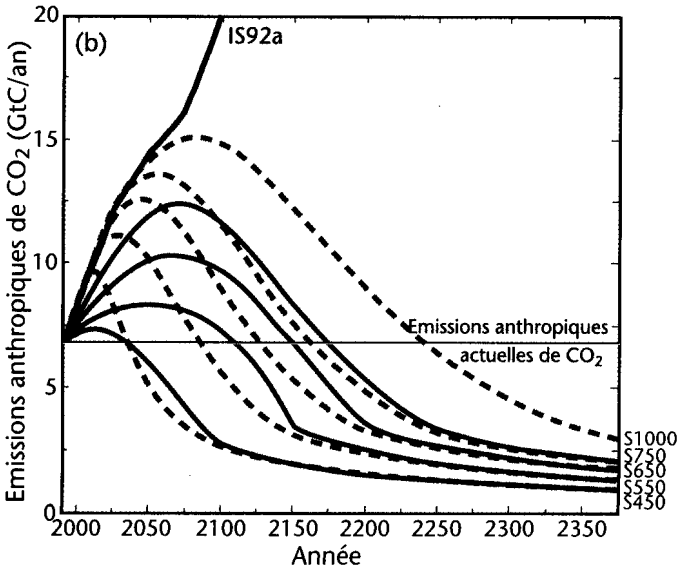


Figure 6.1 : Scénarios WGI et WRE.

Emissions de dioxyde de carbone permettant une stabilisation de la concentration au niveau 450, 550, 650, 750 ou 1000 ppmv selon les profils indiqués ci dessus, d'après un modèle moyen du cycle du carbone

Niveau de stabilisation ppmv	Début des réductions	Coût % Produit Mondial Brut
500	2010	0,7
500	1990	1,1
450	2010	1

Tableau 6.1 : Coût de réduction des émissions pour différentes trajectoires.

D'après Richels et Edmonds[3], figure 5 et 8. Ce tableau montre qu'il est plus économique d'attendre l'année 2010 et de viser 450 ppmv que de commencer aujourd'hui en visant 500 ppmv.

⇒ *Arguments supplémentaires pour attendre*

Pour les auteurs, trois facteurs supplémentaires impliquent qu'il est économiquement intéressant de reporter les efforts de réduction des émissions de dioxyde de carbone d'une ou plusieurs décennie.

- L'actualisation. La productivité marginale du capital, supposée égale à 5% par an, implique qu'allouer des ressources à la limitation des émissions de CO_2 à un coût d'opportunité. Ce point souligne le besoin d'analyse économique, compte tenu de la nature purement géophysique des corridors.
- Le progrès technique. Un mouvement général d'amélioration de l'efficacité dans la fourniture, la transformation et l'utilisation finale de l'énergie existe et continuera certainement à exister. On peut s'attendre à ce que la disponibilité et la compétitivité des technologies propres soient sensiblement meilleures dans le futur.
- La dynamique du CO_2 dans l'atmosphère, qui fait qu'à l'issue d'une période de temps donnée, le carbone émis précocement aura été exposé plus longtemps aux puits naturels que celui émis vers la fin de la période.

En somme, ces quatre arguments montrent que pour minimiser le coût de la modération du changement climatique, il importe de ne pas s'écarter trop rapidement de la trajectoire d'émissions de référence. Par rapport à l'état de la littérature en 1996, la comparaison WGI-WRE au plan économique a pu bousculer un certain nombre de résultats. En effet, nous avons vu en étudiant les modèles au chapitre 4 que beaucoup (CRPS, CETA, DICE...) présentaient des chemins optimaux de réduction dans lesquels un effort important de réduction se produit dès la date initiale.

1.2. Le plafond de 550 ppmv

Pour résumer, le débat sur le timing de l'action, c'est le choix d'une trajectoire à l'intérieur d'un corridor de sécurité. Le débat est ouvert pour autant que les choix à court terme et les choix à long terme peuvent être disjoints.

- D'une part en effet, comme le remarque Edmonds[5] si on envisage un objectif à long terme strict, par exemple un plafond de concentration de CO_2 égal à 400 ppmv, alors il n'y a pas vraiment de débat possible et les politiques à court terme doivent aussi être strictes. Notons qu'une analyse de ce type, que l'on peut synthétiser par « *maintenant que l'on sait que c'est un problème sérieux, nous devons faire le maximum pour le résoudre* », n'est pas exceptionnelle, et tire aussi sa force des déclarations solennelles des États. Mais fixer des objectifs sociaux précis et clairs, comme un plafond de concentration, peut être utile sinon indispensable. Et alors, les ressources de l'économie étant rares, on n'élude plus les quatre arguments cités plus haut sont.
- Symétriquement, le scénario central de référence IS92a du GIEC conduit en 2100 à une concentration de CO_2 autour de 710 ppmv. Il est clair que tout objectif moins ambitieux sera compatible avec des émissions qui suivraient ce profil pendant plusieurs décennies. Si l'on exclut le dépassement temporaire de l'objectif, qui revient à nier le texte de la Convention Climat, cela conduit à penser que toute date de stabilisation postérieure à 2100, ou tout plafond de concentration supérieur à 700 ppmv, n'implique pas d'effort réel à court terme.

Pour préciser l'interprétation en termes économiques, on peut imaginer que le plafond optimal se situe à l'intersection de deux courbes de bénéfice marginal $B(x)$ et de coût marginal $C(x)$, où x est le plafond de concentration. Le premier point suggère que $C(x)$ part vers l'infini lorsque x se décroît en dessous de 400 ppmv. Le second point suggère que $C(x)$ tend vers zéro lorsque x croit au delà de 700 ppmv.

Entre les deux extrêmes exclus 400 et 700 ppmv, le GIEC a déterminé trois niveaux remarquables de concentration : 450, 550 et 650 ppmv. Bien qu'il y aurait certainement intérêt à examiner également 500 et 600 ppm, nous nous restreindrons à ces trois niveaux qui font référence dans les études. En particulier, le niveau central de 550 ppmv correspond à peu près au doublement de la concentration préindustrielle de dioxyde de carbone, estimée à environ 278 ppmv.

Quoiqu'il puisse en paraître arbitraire au plan objectif, se fixer des plafonds de concentration multiples de 50 est pragmatiquement très justifié. La psychologie enseigne en effet[6] que dans une situation en dégradation progressive, se fixer des limites fermes dès le début est nécessaire pour ne pas se laisser entraîner à enchaîner des 'encore un petit peu et puis j'arrête'. C'est pourquoi la loi définit souvent des seuils de pollution *a priori*. Prenons un exemple : la quantité de nitrates dans un litre d'eau potable ne doit pas dépasser cinquante milligrammes. Ce seuil ne provient pas d'une non linéarité physique ou biologique, le litre d'eau contenant cinquante et un milligrammes de nitrates n'est pas beaucoup plus nocif qu'à quarante neuf. Mais pour agir, la gestion politique de l'environnement a besoin de se créer des repères clairs.

Il pourrait sembler que 550ppmv corresponde à la référence $2\times CO_2$ qui sert de base à la majorité des études concernant les conséquences du changement climatique. Cette impression est fausse, car le $2\times CO_2$ correspond à un doublement de la concentration en équivalent carbone, qui tient compte du forçage radiatif additionnel direct et indirect (positif ou négatif) des autres gaz à effet de serre. En conséquence, les effets de $2\times CO_2$ correspondraient en réalité, en supposant que les autres gaz à effet de serre croissent aussi comme dans le scénario de référence, à un peu plus que 450 ppmv pour le CO_2 seul.

Le plafond de 550 ppmv représentant le milieu de la fourchette, il a reçu une attention particulière à ce titre. Toutefois, c'est en fin de compte la prise en compte des impacts du changement climatique, c'est à dire de $\mathsf{B}(x)$, qui détermine la position du plafond judicieux. Compte tenu de l'ampleur des incertitudes, il ne nous a pas semblé convainquant d'accorder une probabilité subjective plus forte à ce plafond plutôt qu'à 450 ou 550 ppmv.

1.3. Le risque de mauvaises nouvelles

⇒ ***Climat***

Rappelons en effet que la connaissance scientifique du système climatique est très incomplète. La fourchette d'évaluation de la sensibilité climatique, qui était chiffrée à 1.5°C - 4.5°C dans le premier rapport du GIEC, n'a pas diminuée au second. Malgré l'effort actuel de recherche en climatologie, on ne peut pas s'attendre à connaître dans un futur proche à quel niveau de concentration vont se produire des 'interférences dangereuses' avec le climat.

Toutefois, même si la sensibilité climatique globale s'avérait faible, il conviendrait néanmoins de se préoccuper du risque de 'surprises climatiques'. Ayant défini et expliqué plus en détail au 1.2 du Chapitre 2 leur vraisemblance, nous nous contenterons ici de citer le GIEC :

> *Des variations inattendues, rapides et de grande ampleur du système climatique (comme il s'en est produit dans le passé) sont difficiles à prévoir 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 comportement imprévisibles. Il est possible de réaliser des progrès en étudiant les processus et les sous-élements non linéaires du système climatique. Citons, parmi les exemples de phénomènes non linéaires, les bouleversements rapides de la circulation dans l'Atlantique Nord et les rétroactions liées aux changements dans les écosystèmes terrestres.*[7]

Ce risque de catastrophe, pour employer le terme mathématique dont il est question, concerne la réponse dynamique du climat au forçage radiatif additionnel. A ces deux incertitudes, sur le niveau et sur la dynamique, s'ajoute un aléa toujours possible sur le rythme de progression de la science. L'exemple de l'ozone montre clairement que l'on peut découvrir des mécanismes scientifiques qui accroissent l'incertitude, ou qui rendent un problème environnemental plus grave qu'on ne le pensait.

⇒ ***Politique***

Le même exemple de l'ozone illustre l'existence d'autres sources d'incertitude et de non-linéarité que la science, susceptible de produire des mauvaises nouvelles conduisant à une crise climatique plus ou

moins aiguë, à l'image d'autres crises environnementales, mais mondialisée. Ces autres sources sont celles qui ont conduit à la décision d'arrêt de la production de CFC à une période de grande incertitude scientifique[8].

En effet, le fond du problème n'est pas tant le choix d'un niveau de concentration que la gravité du problème, et surtout la gravité et l'urgence perçue par les acteurs gouvernants. En ce sens, une mauvaise nouvelle concernant le problème du changement climatique, n'est pas seulement une information défavorable provenant de la science climatologique, mais plus généralement tout événement ou circonstance qui amène à allouer à l'effort de lutte contre cette pollution nettement plus de richesses que ce que l'on espérait.

Les décisions politiques sont aussi influencées par de nombreux facteurs dépassant l'aspect strictement scientifique du problème en jeu, comme les échéances électorales, ou les relations interpersonnelles ou simplement l'opinion publique. Ces aspects de la décision publique contribuent aussi à crédibiliser l'éventualité d'une crise climatique, qui pourrait aboutir à prendre des décisions spectaculaires dans l'urgence. Il est en effet historiquement montré, nous l'avons expliqué au chapitre 3 section 3, que la prise de décision sous controverse peut amener à des mesures coûteuses mais inefficaces, qui différent d'autant la résolution du véritable problème d'environnement[9].

⇒ *Scénario de référence*

Enfin, le risque de mauvaise nouvelle peut aussi provenir d'autres facteurs, capturés dans l'écriture du scénario correspondant à la situation 'de référence'. Rappelons d'abord que, compte tenu de l'échelle des investissements en jeu, on imagine dans tous les scénarios que l'état sera amené à jouer un rôle pour contrebalancer les avantages certains des énergies fossiles à court terme : disponibilité, technologies avancées, réseaux...

Pour dépasser les considérations d'efficacité économique et évoquer les conditions technologiques de la stabilisation, la pénétration importante d'une source d'énergie sans carbone est requise dans les prochaines décennies, s'il s'agit de fournir de l'énergie à deux fois plus d'hommes, chacun consommant deux fois plus de produits manufacturés, sans dépasser un doublement les émissions de CO_2 . En particulier, la décarbonisation de l'énergie supposée dans IS92a ne pourrait pas être réalisée par la seule substitution du gaz au charbon pendant les prochaines décennies. Les scénarios IS92a et IS92b, illustrés Figure 6.2, décrivent une augmentation linéaire des émissions mondiales, l'accroissement correspondant à environ 2% des émissions de 1990.

Le GIEC rappelle cependant que ces scénarios centraux ne constituent en aucun cas des prédictions. Sans reprendre la dissection de l'identité dite de Kaya exposée au chapitre 2 paragraphe 3, rappelons que les scénarios centraux IS92a et b ne sont pas le signe de l'existence d'un équilibre stable entre d'une part la croissance démographique et économique, et de l'autre l'amélioration de l'efficacité énergétique et la décarbonisation de l'énergie.

Dans un contexte de pétrole bon marché, et suite à l'achèvement des transitions vers l'économie de marché à l'Est, les émissions de l'Annexe I qui se sont stabilisées entre 1990 et 1995 pourraient recommencer à croître, ce qui rendrait d'autant plus difficilement atteignables les objectifs fixés à Kyoto. Un scénario réciproque est possible, dans l'hypothèse par exemple d'une crise économique mondiale ou de progrès rapides sur une source d'énergie alternative.

En conclusion, de même que les incertitudes scientifiques conduisent ne pas accepter de privilégier le plafond de concentration à 550 ppmv plutôt qu'à 450 ou 650 , les incertitudes socio-économiques conduisent à envisager l'éventualité d'une tendance en émissions plus haute comme IS92f. Ceci traduit la possibilité d'une augmentation soudaine du degré de gravité ou d'urgence du problème du changement climatique, qui pourrait aussi provenir de facteurs extérieurs au problème lui même, propres au fonctionnement des mécanismes de régulation dans les sociétés.

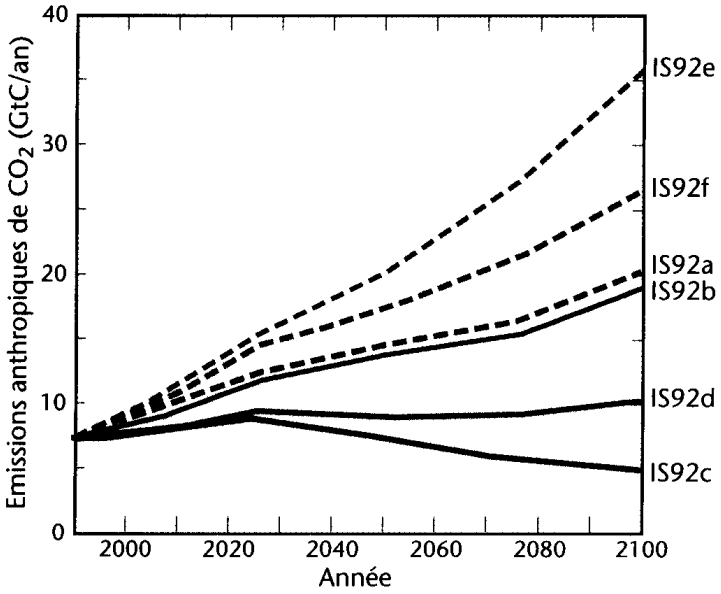


Figure 6.2 : Émissions de CO_2, scénarios IS92.

Source: GIEC.

1.4. Conclusion : « stratégie » WRE et accélération.

Ce qui précède peut être directement relié à la controverse à propos des scénarios WRE. Ces scénarios peuvent être et ont été qualifiés de 'non interventionnistes' car ils suivent initialement le scénario IS92a. Ceci repose sur une identification entre IS92a et les implications d'une politique de 'laissez faire' énergétique qui est loin d'être justifiée.

Wigley, Richels et Edmonds explicitent qu'ils n'apportent pas un message d'attente, mais préconisent un engagement rapide et durable de recherche, développement et démonstration pour s'assurer de la disponibilité des énergies alternatives, sans ou pauvres en carbone, lorsqu'elles seront nécessaires. Les scénarios WRE projettent des réductions d'émission très rapides après cette phase initiale de R & D.

Il est toutefois possible de jeter un regard critique sur cette approche en deux temps, notamment à la lumière des idées développées au chapitre 5 sur le progrès technique induit et la sous estimation des coûts d'ajustement dans les modèles :

- Le premier point rappelle que la limitation de l'usage des énergies fossiles est un facteur favorable au développement des énergies alternatives. En leur ouvrant accès à davantage de marchés, les économies d'échelles et la progression le long de la courbe d'apprentissage sont accélérées, et l'innovation est stimulée.
- Le second point pose le problème de la faisabilité d'une transition rapide. Alors que nous avons vu que historiquement les nouvelles formes d'énergie ont mis environ un demi siècle pour passer de 1 à 50% de leur potentiel de marché, sur la trajectoire WRE550 la tendance des émissions se passe en environ trente ans d'une hausse régulière et rapide à une baisse équivalente. Hors d'un cadre de planification centralisée, et on peut difficilement tabler sur un gouvernement mondial en 2030, on imagine mal comment une telle révolution des schémas d'investissement et de consommation pourraient être administrée.

La trajectoire S450, à cet égard, peut paraître excessivement radicale. Le retournement quasi instantané de tendance qu'elle décrit ne semble pas compatible avec une continuité institutionnelle et économique que les décideurs pourraient souhaiter : c'est un scénario de 'crise climatique'. Le problème de l'accélération dans scénario défavorable, représenté ici par le plafond 450, peut paraître

accessoire, et cela d'autant plus que présenté ainsi, la stabilisation à 450 ppmv apparaît peu réalisable. Cette présentation est toutefois malheureuse. Certes, laisser les émissions croître augmente le coût de réduction et donc accroît le niveau du plafond optimal de concentration, mais cela ne contribue pas vraiment à résoudre le problème climatique au contraire.

Dans le cadre d'analyse utilisé pour présenter les scénarios WRE, ce problème de l'accélération ne rejailli que faiblement sur les avantages des autres scénarios à 550 ppmv et au dessus. Mais le cadre conceptuel plus approprié est celui de la décision séquentielle. Cette notion ayant été déjà exposée aux chapitres précédent, nous nous contenterons de la rappeler par une formule de T. Wirth[10] :

> *« Sound policies in the near term will allow us to avoid the prospect of truly draconian and economically disruptive policies in the future. »*

Concrètement, les négociations actuelles pourraient par exemple aboutir à des objectifs de réduction à court terme compatibles avec un objectif de stabilisation de 550ppmv, et être obligés dans un second temps d'accélérer ou de ralentir la réduction. Le problème de l'accélération en cas de mauvaise nouvelles prend alors une dimension supérieure.

2. *Stratégie de précaution et limitation de la concentration*

2.1. Décision séquentielle et arbitrage trop tardif / trop précoce

Pour illustrer comment la différence entre l'approche coût-bénéfice et le contexte réel de la décision séquentielle, la métaphore[11] suivante est parfois utilisée :

> *L'approche « coût-bénéfice » appliquée sur le très long terme se rapproche du comportement d'un champion de formule 1 à l'entrée d'une série de virages d'un circuit comportant des passages à l'aveugle. Sa « fonction objectif » est de maximiser sa vitesse dans un contexte d'incertitudes non négligeables sur la présence d'huile ou de gravillons dans les courbes, l'adhérence des pneus ou les réactions du conducteur qui le précède. Mais il tire de son expérience une sorte de « connaissance statistique » et son comportement est assimilable à celui d'un calcul d'optimisation : il opte d'entrée pour une trajectoire optimale en tenant compte implicitement des distributions de probabilités sur les paramètres incertains, en se fiant à son expérience pour rester dans les limites des possibilités d'adaptation permises par ses réflexes.*
>
> *Tel n'est pas bien entendu le cas du conducteur (père de famille) qui ignore s'il va trouver une plaque de verglas dans un virage surplombant un précipice sur une route de montagne et si une voiture venant en sens inverse ne va pas limiter ses possibilités d'adaptation. Lui aussi veut maximiser sa vitesse, mais son comportement est tout autre ; il lâche l'accélérateur, presse légèrement la pédale de frein, prêt à ralentir plus fortement en cas de brillance du verglas, à réaccélérer dans le cas contraire ; un calcul de probabilité risquerait en effet de l'acculer au choix entre le précipice et la collision. Les risques étant trop contrastés, la distribution de probabilité trop inconnue et l'information utile risquant de venir trop tard en raison de l'inertie du véhicule, le comportement raisonnable n'est alors pas de choisir une trajectoire optimisée une fois pour toute, comme dans une « décision à un coup », mais d'opter pour un processus séquentiel où les premières décisions visent à augmenter le temps d'apprentissage et harmoniser vitesse du véhicule et amélioration de l'information.*

Dans le contexte de décision séquentielle, l'inertie devient une variable clé, qui agit dans les deux sens. Elle augmente les coûts de réduction à court terme, mais aussi les coûts d'un resserrage éventuel de la contrainte de stabilisation. Une approche quantitative permet d'examiner dans quelle mesure l'un ou l'autre de ces effets prédomine. Dans les sections suivantes, DIAM exposé précédemment est modifié pour quantifier explicitement cet arbitrage, formulé ainsi par le GIEC :

> *« The choice of abatement paths involves balancing the economic risks of rapid abatement now (that premature capital stock retirement will later be proven unnecessary), against the corresponding risks of delay (that more rapid reduction will then be required, necessitating premature retirement of future capital)»*

Est on sûr qu'un plafond de concentration qui n'entraîne pas d'interférences dangereuses avec le climat sera au dessus de 550 ppmv ? La suite suggère que si on ne l'est pas, alors il est intéressant de commencer à limiter les émissions immédiatement, afin de se couvrir contre le risque de surprises désagréables et coûteuse en termes économiques et écologiques.

2.2. Le modèle

Pour l'analyse, nous étendons DIAM au cas stochastique en nous inspirant de la méthode exposée par Manne[12], mais dans un cadre coût-efficacité. Les trajectoires de réduction ne sont pas préspécifiées mais déterminées par le programme sur l'intervalle [1997, 2300]. Il s'agit d'un modèle d'optimisation intertemporel qui minimise la somme actualisée des coûts de réduction, sous la contrainte de stabilisation de la concentration. Les équations du modèle sont rappelées Encadré 6.1. Le principe de la programmation dynamique stochastique est discuté plus en détails en annexe.

Indices ***t***, ***u*** refers to time periods ; ***s*** refers to states of the world. DIAM finds the optimal abatement strategy ***x*(s,t)*** by minimizing total expected discounted abatement cost **J** defined Eq. 1. under Eq. 2, the concentration ceiling constraint and Eq. 3, the dynamic programming constraint. Eq. 4 defines CO_2 atmospheric concentration **M(*s,t*)**, and Eq. 5 defines acceleration of abatement **A(*s,t*)** . Abatement costs **C(*s,t*)** are defined by Eq. 6 . Alternatively, Eq. 6 bis is used to test sensitivity of results to the shape of the cost function.

Time profile $\mathbf{E^{ref}}(t)$ refers to anthropogenic fossil carbon emissions in IPCC scenario IS92a . The reference CO_2 concentration path $\mathbf{M^{ref}}(t)$ is computed from IS92a total carbon emission with the atmospheric perturbation CO_2 response function **R(*u*)** according to the linear carbon cycle model framework in Enting (1995) or Hasselmann (1996). All data taken from Enting, Wigley and Heimann (1994, model W).

Reduction costs are determined by a social risk-free discount rate ρ (we explore 3% or 5%, to account for pending controversies) ; a technical progress rate of exogenous decline in reduction costs **r** (1%) and a characteristic time of energy systems τ (20 years in conventional models, 50 years after our estimates). The costs scale parameter $\mathbf{c_a}(\tau)$ is set ($c_a(50)=1.36$, $_{ca}(20)=3.18$) so that total costs are comparable to DICE's results [8]. Note that when Eq.6 is reported into Eq. 1, the $c_a(\tau)$ can get out of under the Σ , this implying that the optimal ***x*(s,t)*** is completely independant of $c_a(\tau)$.

The stochastic concentration ceiling is defined by the number of alternatives examined **N** ; ceilings levels **L(*s*)** ; subjective probabilities **p(*s*)** and the date of uncertainty resolution $\mathbf{t_{info}}$.

Results are shown Tableau 6.2 and Figure 6.3. First, we examine certainty scenarios N=1 for different values of τ, ρ and L (sensibitivity to r is mathematically the same as sensitivity to ρ). Then we explore N=3 with equidistribution over {450, 550, 650} ppmv, for t_{info} = 2020 and t_{info} = 2035.

(Equation 6.1) $$J = \sum_{1\le s\le N} p(s) \sum_{t=1997}^{t=2300} (1+\rho)^{t_0 - t} C(s,t)$$

(Equation 6.2) $$M(s, t) \le L(s)$$

(Equation 6.3) $$\forall\, t \le t_{info},\ \forall\, s,\ 1 \le s \le N,\ x(s, t) = x(1, t)$$

(Equation 6.4) $$M(s, t) = M^{ref}(t) - 0.471 \sum_{u = t0}^{u = t-1} R(t-u)\, x(s, u)\, E^{ref}(u)$$

(Equation 6.5) $$A(s, t) = x(s, t) - x(s, t -1)$$

(Equation 6.6) $$C(s, t) = c_a(\tau)\, (1+r)^{t0 - t} \frac{E^{ref}(t)}{E^{ref}(t_0)} [\, x(s, t)^2 + \tau^2 A(s, t)^2 \,]$$

(Equation 6.7) $$C(s, t) = c_a(\tau)\, (1+r)^{t0 - t} \frac{E^{ref}(t)}{E^{ref}(t_0)} [\, x(s, t)^2 \max (1, \tau A(s, t)) \,]$$

Encadré 6.1 : Équations de DIAM en coût-efficacité stochastique

Compte tenu des controverses concernant le taux d'actualisation, nous avons choisi d'étudier à la fois les taux de 3% et 5%. Nous avons fixé le taux de progrès technique autonome à 1%. Cela peut sembler arbitraire par rapport à des modèles plus détaillés comme Global 2100 ou ERB[13]. En fait, ces modèles comportent aussi beaucoup de paramètres empiriques arbitraires, mais comme ils ne sont jamais décrits extensivement, cela ne se voit pas. Ceci dit, ERB comporte aussi un taux de progression exogène de l'efficacité énergétique de 1% et Global 2100 inclus un taux d'AEEI de 0,5% en moyenne.

Nous paramètrisons la fonction de coût par c_a et τ , au lieu de c_a et c_b . Le paramètre dans DIAM qui commande la structure des coûts de réduction est le ratio $\tau = \sqrt{c_b / c_a}$. Il a la dimension d'une durée caractéristique. On peut donc l'interpréter grossièrement comme la durée de demi-vie exponentielle du système énergétique global, ou encore comme la durée nécessaire pour stabiliser les émissions.

Comme nous l'avons expliqué précédemment, l'expérience passée montre empiriquement que globalement, les nouvelles sources d'énergie mettent environ 50 ans pour atteindre un taux de

pénétration de 1% à 50% de leur potentiel final, ce qui peut s'expliquer par l'importance des investissements à très long terme dans les systèmes énergétiques et l'inertie institutionnelle. La valeur $\tau_{welfare}$ = 50 ans représente donc encore notre point de vue de référence quand à la structure temporelle de la fonction 'coût de réduction'.

Toutefois, il a semblé nécessaire d'étudier également la valeur $\tau_{macroeconomic}$ = 20 ans pour plusieurs raisons :

- Cette valeur peut sembler plus appropriée si l'on souhaite tenir compte seulement de la durée de vie du capital physique dans le secteur énergétique comme les équipements des ménages, centrales électriques, raffineries.
- Comme nous l'avons expliqué plus haut, les modèles précédents tendaient à sous estimer l'inertie. Il importe donc d'étudier dans quelle mesure nos résultats proviennent d'une réévaluation de celle ci et dans quelle mesure ils proviennent du passage en décision séquentielle.
- Avec cette valeur, DIAM reproduit les intuitions transmises par WRE au sens où les réductions en 2020 sont faibles, de l'ordre de 2% (réduction des émissions de CO_2 sur une trajectoire optimale vers un plafond de 550 ppmv).

Une valeur sensiblement inférieure de τ serait peu réaliste, car cela conduirait à des coûts d'ajustement négligeables. En effet, quel que soit le chemin de réduction considère, la part des coûts d'ajustement dans les coûts totaux diminue avec τ , et l'ordre de grandeur 14% - 25% que l'on obtient avec $\tau_{macroeconomic}$ constitue déjà un chiffre bas. Elle est aussi compatible avec une réforme rapide des émissions comme on le trouve, par exemple, dans le scénario WRE450, basée sur l'existence de technologies de substitution disponibles.

Notons enfin que si notre hypothèse basse sur τ , qui produit des *résultats* comparables à ceux des modèles d'équilibre général comme DICE ou MERGE2 , est aussi compatible avec leurs propres *hypothèses* concernant la dépréciation du capital au taux de 5% par an. En effet, si on interprète τ comme la demi-vie exponentielle du capital, celui ci est relié au taux de dépréciation annuel δ par :

Equation 6.8 $$\tau = (\ln 2) / \delta$$

Avec cette relation, $\tau = 20$ correspond à peu près à $\delta = 4\%$.

Afin de montrer que nos résultats ne dépendent pas excessivement de la forme spécifique de la fonction de coût (Equation 6.6) dans DIAM, nous avons également utilisé la forme alternative (Equation 6.7) venant du modèle URGENCE. L'accélération *A* peut en effet être interprétée comme le renouvellement du capital productif. Tant que ce renouvellement est inférieur au seuil naturel $1/\tau$, les coûts d'ajustement supplémentaires pour mettre en place des technologies propres sont négligeables. C'est lorsque le rythme de renouvellement du capital excède le rythme naturel que les coûts de réduction sont multipliés.

2.3. Résultats : Optimisation vers un objectif connu

Avant d'examiner les résultats en décision séquentielle, nous allons tout d'abord examiner la sensibilité des trajectoires optimales aux divers paramètres, en supposant l'objectif de concentration connu dès le départ.

La Figure 6.3 montre que dans les limites des paramètres explorés ici :

⇒ ni le taux d'actualisation

⇒ ni l'inertie

ne changent à eux seuls les résultats, alors que l'incertitude sur le niveau de stabilisation joue un grand rôle. Notons qu'une remise en cause des valeurs explorées reste toujours possible. Mais les plages étudiées représentent des valeurs raisonnablement admises dans la littérature, ce n'est donc pas le lieu de rouvrir la discussion.

Les courbes sont confirmées par les chiffres du Tableau 6.2 page 178. La colonne x_{2020} montre que lorsque l'on considère le plafond de concentration 550 ppm, augmenter τ augmente le niveau de réduction optimal en 2020 de un ou deux points de pourcentage. De même, actualiser à 3% au lieu de 5% n'augmente que de quelques points la réduction optimale à court terme. Tout ceci ne nous fait pas sortir du domaine des réductions modestes, puisque x_{2020} = 5% correspondrait à une réduction de la part de l'OCDE seule d'environ 4% par rapport un niveau de 1990. Ces résultats se retrouvent également avec la fonction de coût multiplicative (Equation 6.7). Avec cette équation, la réduction optimale est indépendante de l'inertie lorsque la contrainte environnementale est faible. En effet, dans ce cas, le renouvellement du capital n'est jamais accéléré au delà de son taux naturel.

Par contre, les scénarios optimaux avec une contrainte de réduction à 450 ppmv sont notablement différents. La réduction optimale en 2020 est de l'ordre de 20%, ce qui correspondrait à une réduction

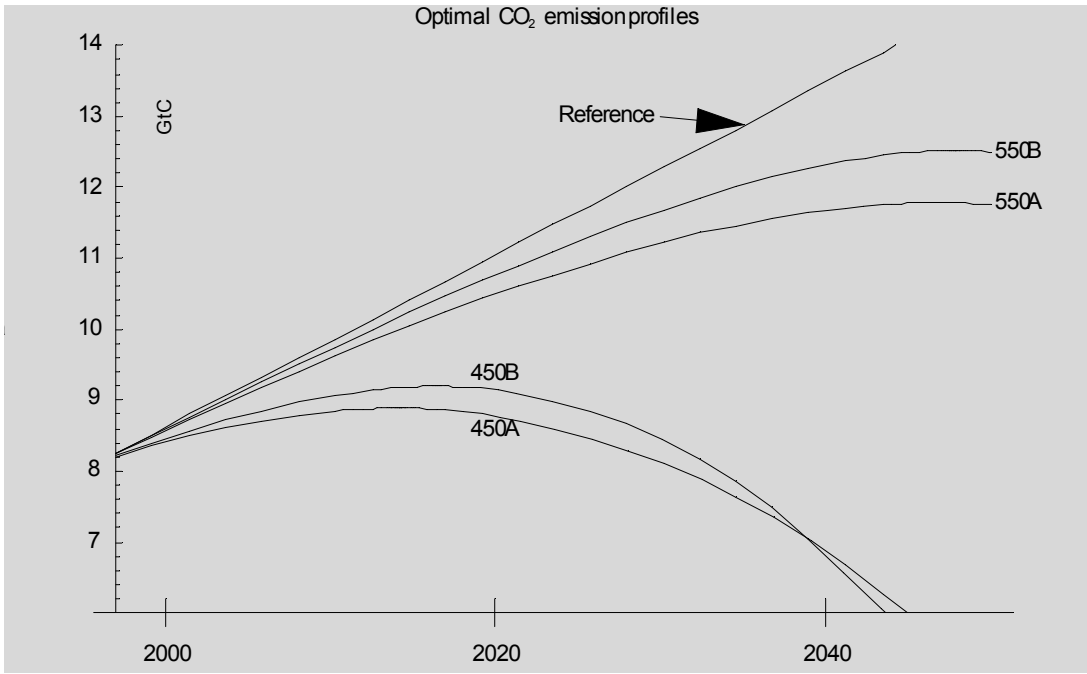


Figure 6.3 : Chemins de réduction optimaux 'one shot'

Chemins de réduction en connaissant le plafond depuis le début. Les courbes A et B atteignent 550ppmv, C et D atteignent 450. Les courbes B et D sont optimales avec un taux d'actualisation et une inertie du système énergétique supérieure par rapport à A et C. Cela explique qu'elles correspondent à plus d'émissions à court et moyen terme. Le cas central, A, est entre WRE550 et IPCC S550 en ce qui concerne les émissions à court terme. Le cas alternatif B correspond à WRE550.

de l'OCDE seule de 50% par rapport à IS92a. Ce scénario permet d'introduire un nouveau concept significatif : le coût du délai. Dans le cas du plafond 450ppmv, l'augmentation du coût si l'on attend vingt ans atteint 35% si $\tau = 20$ et reste significative (14%) avec les paramètres représentant l'autre point de vue. La Figure 6.4 montre que, après un délaidélai de deux décennies, le coût de réduction pour atteindre 450 ppm pourraient devenir '*draconian and economically disruptive*'.

Tout ceci ne ce produit pas au niveau de 550ppmv ou au dessus. C'est la raison de la différence radicale entre nos résultats et ceux de Yohe et Wallace[14] examinés au chapitre 4, qui trouvent que la stratégie optimale à court terme est de ne pas réduire significativement les émissions. Cela s'explique parce que le niveau minimal de stabilisation qu'ils considèrent est 550 ppmv et utilisent un modèle dans lequel la dépréciation du capital est 10% et le taux d'actualisation de 5%. En conséquence l'hypothèse d'une crise climatique rapprochée est en fait exclue de leur modèle.

La Figure 6.5 permet de vérifier, *ex post*, la vraisemblance de DIAM pour la quantification des coûts d'ajustement, sur le jeu de paramètres pour lesquels ils sont les plus importants.

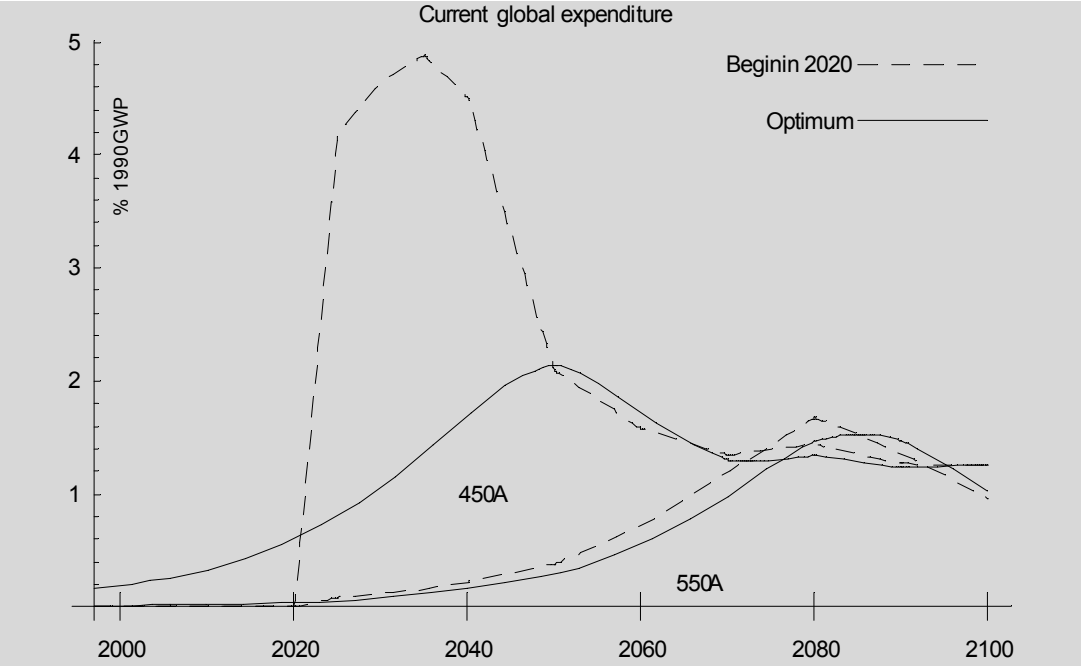


Figure 6.4 : Conséquences d'un délai pour 450 ou 550 ppmv

Profil des dépenses courantes pour atteindre des objectifs de stabilisation à 450 et 550 ppmv. En trait plein, sur les chemins optimaux; en trait pointillés, avec un délai de 20 ans. Pour aller à 450 ppmv, la courbe de dépenses présente un pic abrupt et élevé après le délai, à cause des coûts d'ajustement élevés dans la période comprise entre 2020 et 2040. Ce résultat apparaît pas pour 550 ppmv. Dans ce second cas, même après un délai, le temps disponible pour stabiliser la concentration est supérieur à la durée caractéristique de réforme du système énergétique global.

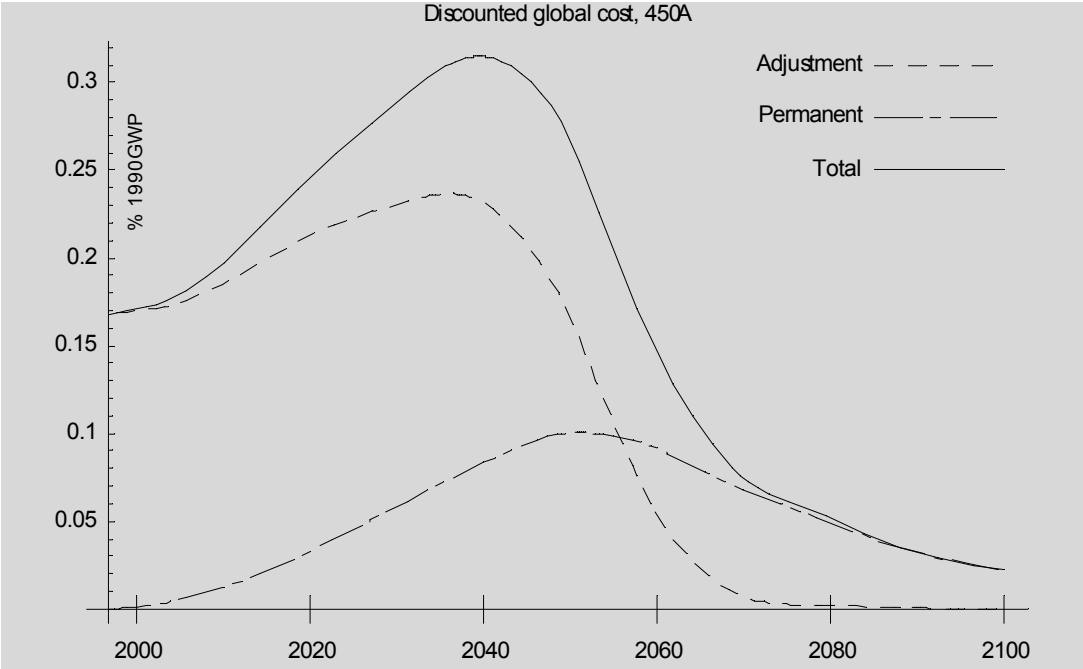


Figure 6.5 : Profils temporels des coûts de réduction

L'unité est le % du Produit Mondial Brut, et la magnitude des coûts est calibrée sur la fonction de coût définie par DICE (Nordhaus, 1992). Mais C étant homogène de degré 1 en c_a, la forme relative des courbes de coût et la forme des chemins de réduction optimaux est indépendante de l'échelle des coûts

Le coût de réduction actualisé correspondant au chemin 450A, et sa décomposition en coût d'ajustement (proportionnel à x'□)et coût permanent (proportionnel à x □). Le rapport entre l'aire sous la courbe 'Ajustement' et l'aire sous la courbe 'Total' représente la part des coûts d'ajustement dans les coûts totaux représenté Tableau 6.2 dans la colonne $\frac{adj.}{total}$.

Certainty scenarios	D yr	ρ	L ppmv	t_{stab}	x_{2020}	x_{2020} (#)	E_{max} GtC	$t_{E_{max}}$	adj. / total	Coût du delai
450A†	*50*	*3%*	*450*	2060	24%	19%	8.7	2015	59%	+70%
450B†	*20*	*5%*	*450*	2050	19%	14%	9.2	2015	32%	+32%
450C	*50*	*5%*	*450*	2050	20%	19%	9.1	2015	74%	+72%
450D	*20*	*3%*	*450*	2060	23%	12%	8.8	2015	19%	+25%
550A†	*50*	*3%*	*550*	2100	7%	4%	11.5	2050	55%	+10%
550B†	*20*	*5%*	*550*	2080	3%	2%	12.6	2050	31%	+2%
550C	*50*	*5%*	*550*	2090	4%	2%	12.2	2050	71%	+8%
550D	*20*	*3%*	*550*	2090	5%	4%	11.9	2050	18%	+3%
650A	*50*	*5%*	*650*	2125	3%	0%	14.1	2070	55%	+4%
Hedging strategies	**D yr**	**ρ**	**N**	t_{info}	x_{2020}	x_{2020} (#)	x_{2010}	E_{2020} GtC		
U550A*	*50*	*3%*	*3*	*2020*	14%	14%	8%	9.6		
U550B	*20*	*5%*	*3*	*2020*	9%	6%	4%	10.1		
U550C	*50*	*5%*	*3*	*2020*	11%	13%	6%	9.9		
U550L (late)	*50*	*3%*	*3*	*2035*	21%	17%	12%	8.9		
U550W (wide)	*50*	*3%*	*5*	*2020*	48%		35%	6.28		
U550WE	*50*	*3%*	*5*	*2010*			10%			

Tableau 6.2 : Caractéristiques des scénarios et stratégies d'émission optimaux

Le paramètre $\tau = \sqrt{\frac{c_b}{c_a}}$ *représente la durée caractéristique du système énergétique global. Le paramètre* ρ *est le taux d'actualisation,* S *le niveau de stabilisation. La colonne* t_{stab} *indique la date de stabilisation optimale,* x_{2020} *le niveau optimal de réduction des émissions en 2020. Les coordonnées (*E_{max} *,* t_{Emax}*) sont celles du maximum de la courbe d'émissions. La colonne* $\frac{adj.}{total}$ *indique la part des coûts d'ajustement dans le total des coût.* E_{cumul} *représente les émissions industrielles cumulées entre 1990 et* t_{stab}*. Le coût du délai est l'augmentation relative du coût lorsque l'on impose un délai de 20 ans avant de commencer à réduire les émissions.*

Lorsqu'on compare B à A, ou D à E, on remarque que les émissions cumulées sont inférieures dans B et D bien que les émissions à court et moyen terme soient supérieures. Cela est du au fait que la date de stabilisation optimale est plus éloignée dans les scénarios A et E.

Les stratégies optimales considèrent une équidistribution entre les plafond de concentration 450, 550 and 650 ppmv, le plafond étant fixé à la date t_{info}*.*

Le haut de la Figure 6.5 montre les coûts actualisés correspondant à C, le bas montre les dépenses correspondant à A, C et les scénarios avec délai correspondant. Le haut de la Figure 6.3 montre les émissions des scénarios A à D, le bas montre les émissions des stratégies G, H, I.

† Profil montré Figure 6.3 a.

 # Fonction de Coût multiplicative Eq. 6bis.

2.4. Résultats : Décision séquentielle

Lorsque l'on résout le problème en considérant une contrainte de stabilisation non connue aujourd'hui, un changement qualitatif notable des résultats se produit. Dans ce cas de figure, on suppose que, à une date donnée, la décision sera prise de fixer le plafond de concentration final à 450, 550 ou 650 ppmv, et l'on accorde un poids égal à chacune des trois hypothèses.

La Figure 6.7 montre que dans le contexte de décision séquentielle, les émissions optimales à court terme sont sensiblement inférieures au cas certain équivalent, vers 550 ppmv. Le Tableau 6.2 confirme que le niveau optimal de réduction en 2020 passe de 2%-6% à 9%-18%. Dans le raisonnement dynamique sous contrainte stochastique, les coûts d'un éventuel ajustement tardif vers 450 ppm dominent les coûts d'une réduction précoce. Ce résultat reste vérifié lorsque l'on change les paramètres d'inertie, d'actualisation et la date d'arrivée de l'information.

Concernant cette dernière, on peut comprendre intuitivement que, l'effet est d'autant plus important que l'information arrivera tard. La réduction optimale x_{2020} passe de 14% à 18% si l'information arrive en 2035 (U550L) au lieu de 2020. A la limite, si l'information arrive en 2100 par exemple, le résultat optimal serait peu différent d'une trajectoire qui respecterait un plafond à 450 ppmv donné au départ.

En effet, le modèle comporte une représentation forte de la précaution qui impose de ne pas dépasser le seuil le plus bas envisagé dans l'attente de la résolution des incertitudes. Dans DIAM , il existe donc une différence de fond entre l'équivalent certain, qui revient à un plafond de 550 ppmv, et la résolution tardive de l'incertitude, qui équivaut à 450 ppmv.

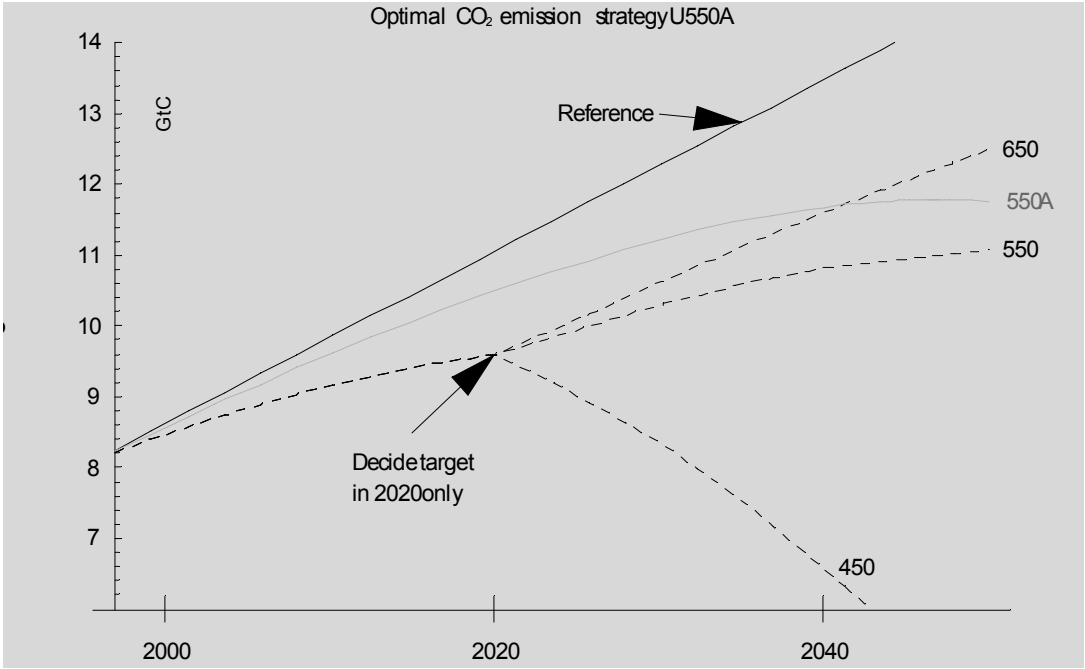


Figure 6.6 : Stratégie optimale en décision séquentielle, cas central.

Stratégies optimales. Pour le cas central G et le cas alternatif H, le plafond de concentration est décidé en 2020. Pendant les 23 premières années, il y a donc une politique de précaution, puis trois cas sont possibles selon le plafond final. Les réductions optimales en 2020 sont de l'ordre de 9% à 18%. Par rapport au cas 550A visent le même plafond espéré, la différence est qualitative : la réduction fait plus que doubler.

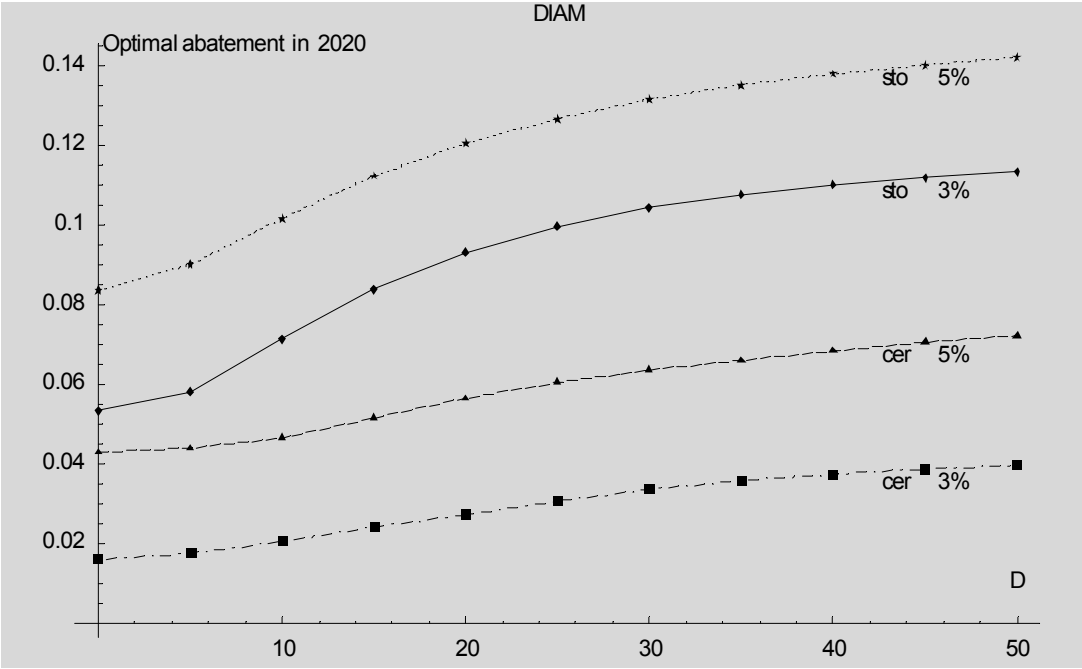


Figure 6.7 : Inertie, actualisation et réduction optimale à court terme

Ces courbes représentent la réduction optimale en 2020 en fonction de l'inertie, variant de 0 à 50 ans. Les deux courbes du bas 'cer' correspondent au cas où le plafond de concentration 550 ppmv est connu dès le départ, pour deux valeurs du taux d'actualisation. Chacune est à comparer avec la courbe correspondante en haut, en décision séquentielle.

La sensibilité à l'inertie et à l'actualisation est représentée sur la Figure 6.7. Celle ci confirme d'abord que la réduction optimale en décision séquentielle (courbes 'sto') est nettement supérieure, d'environ 100%, à la réduction optimale dans le cas sans résolution de l'incertitude (courbes 'cer'), et cela pour toutes les valeurs de l'inertie et de l'actualisation.

On observe de plus comment l'inertie prend une importance supplémentaire avec l'incertitude : Dans le cas certain, la question du taux d'actualisation prédomine sur celle de l'inertie. En haut par contre, lorsque le plafond de concentration est fixé, alors les résultats sont au moins aussi sensibles à l'inertie (+4 points entre $D = 10$ et $D = 50$) qu'au taux d'actualisation (+3 points entre $\rho = 3\%$ et $\rho = 5\%$).

Pour terminer l'analyse de sensibilité, nous pouvons ensuite examiner sur la Figure 6.8 le cas U550W où l'on accorde un poids de 1% à un plafond de 400 ppmv. Il apparaît alors que la stratégie optimale consiste à réduire brutalement les émissions dès à présent. On comprendre le comportement du modèle : celui ci préserve l'option de rester sous 400 ppmv jusqu'en 2020, même au prix de coûts d'ajustement énormes. Mais au fond, ce résultat illustre une limite de l'analyse coût-efficacité. Dans la suite, nous allons examiner une critique du résultat dans un cadre coût-bénéfice, et aussi comment y répondre.

Pour conclure ce paragraphe sur une image, Wigley, Richels et Edmonds rappellent que l'inertie limite la déviation par rapport à la tendance actuelle et en ce sens, le passé s'impose au présent. Mais l'économie, comme Janus, est tournée à la fois vers le passé et l'avenir. Avec beaucoup d'inertie, même pour une contrainte éloignée de plusieurs décennies, il est optimal de commencer dès aujourd'hui à prêter attention au contenu en carbone de nos investissements. En cela, le futur s'impose au présent. D'un point de vue décisionnel, il est optimal de payer aujourd'hui pour s'assurer contre un choc économique au cas où l'on découvrirait le besoin de s'imposer une limite de concentration plus stricte.

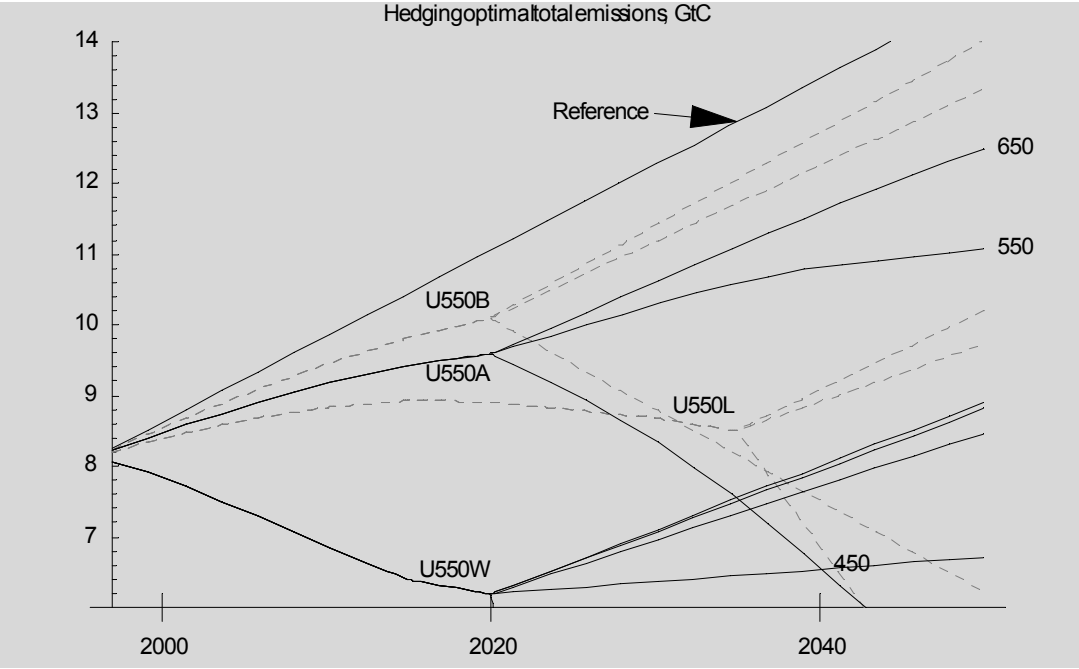


Figure 6.8 : Diverses stratégies optimales.

Le cas central U550A est actualisé à 3% et correspond à une inertie de 50 ans. Le cas alternatif U550B est actualisé à 5%, inertie 20 ans. Dans le cas U550L, la décision sur le seuil final est prise seulement en 2035. Pour U550W, on considère avec un poids de 1% un seuil de 400ppmv. (autres paramètres Tableau 6.2)

Figure 6.9 : Janus

Janus is the Roman god of gates and doors (*ianua*), beginnings and endings, and hence represented with a double-faced head, each looking in opposite directions. He was worshipped at the beginning of the harvest time, planting, marriage, birth, and other types of beginnings, especially the beginnings of important events in a person's life. Janus also represents the transition between primitive life and civilisation, between the countryside and the city, peace and war, and the growing-up of young people.

One tradition states that he came from Thessaly and that he was welcomed by Camese in Latium, where they shared a kingdom. They married and had several children, among which the river god Tiberinus (after whom the river Tiber is named). When his wife died, Janus became the sole ruler of Latium. He sheltered Saturn when he was fleeing from Jupiter. Janus, as the first king of Latium, brought the people a time of peace and welfare; the Golden Age.

He introduced money, cultivation of the fields, and the laws. After his death he was deified and became the protector of Rome. When Romulus and his associates stole the Sabine Virgins, the Sabines attacked the city. The daughter of one of the guards on the Capitolian Hill betrayed the fellow countrymen and guided the enemy into the city. They attempted to climb the hill but Janus made a hot spring erupt from the ground, and the would-be attackers fled from the city. Ever since, the gates of his temple were kept open in times of war so the god would be ready to intervene when necessary. In times of peace the gates were closed.

His most famous sanctuary was a portal on the Forum Romanum through which the Roman legionairs went to war. He also had a temple on the Forum Olitorium, and in the first century another temple was build on the Forum of Nerva. This one had four portals, called Janus Quadrifons. When Rome became a republic, one of the royal functions survived, namely that of *rex sacrorum* or *rex sacrificulus*. His priests regularly sacrificed to him.

The month of January (the eleventh Roman month) is named after him. Janus was represented with two faces, originally one face was bearded while the other was not (probably a symbol of the sun and the moon). Later both faces were bearded. In his right hand he holds a key. The double-faced head appears on many Roman coins, and around the 2nd century BC even with four faces.

Dr. Vollmer's Wörterbuch der Mythologie aller Völker. Stuttgart: Hoffmann'sche Verlagsbuchhandlung, 1874[15].

3. *Approche coût (certain)-bénéfice (aléatoire)*

Nous avons remarqué au paragraphe précédent une différence entre l'équivalent certain et la résolution tardive des incertitudes. Cette situation pose un problème. Il serait plus satisfaisant que les stratégies optimales en décision séquentielle tendent continuement vers la trajectoire optimale en équivalent certain lorsque la date d'arrivée de l'information tend vers l'infini. Cela ne se produit pas avec l'analyse coût-efficacité, qui introduit des discontinuités sous la forme de contraintes.

Dans ce paragraphe, nous allons remettre en question en coût-bénéfice le résultat précédemment montré en coût-efficacité. Dans le premier et le second titre, nous exposerons une critique tendant à montrer que, si l'on abandonne la contrainte forte que constituent les plafonds de concentration, alors les réductions optimales à court terme sont peu influencées par l'incertitude. Dans le troisième titre, nous réfuterons la critique, en montrant qu'elle dépend d'une représentation particulière des dommages climatiques.

La question du coûtdélai: du délai, en particulier, se pose différemment. En coût-efficacité, imposer délai avant de réduire augmente le coût de réduction des émissions, puisqu'on trouve alors un optimum contraint par rapport à un optimum libre. Cela n'est plus évident dans le cadre de l'analyse coût-bénéfice, puisque le coût total est la somme du coût de réduction et des dommages climatiques. En imposant un délai, le coût total à l'optimum augmente bien entendu, et les dommages climatiques aussi, mais il se peut que le coût de réduction diminue. La discussion, nous allons le voir, se reporte alors sur la façon dont on représente l'augmentation des dommages climatiques, et elle devient difficile car ceux ci sont empiriquement mal connus.

3.1. Un calcul de la Valeur Espérée de l'Information Présente

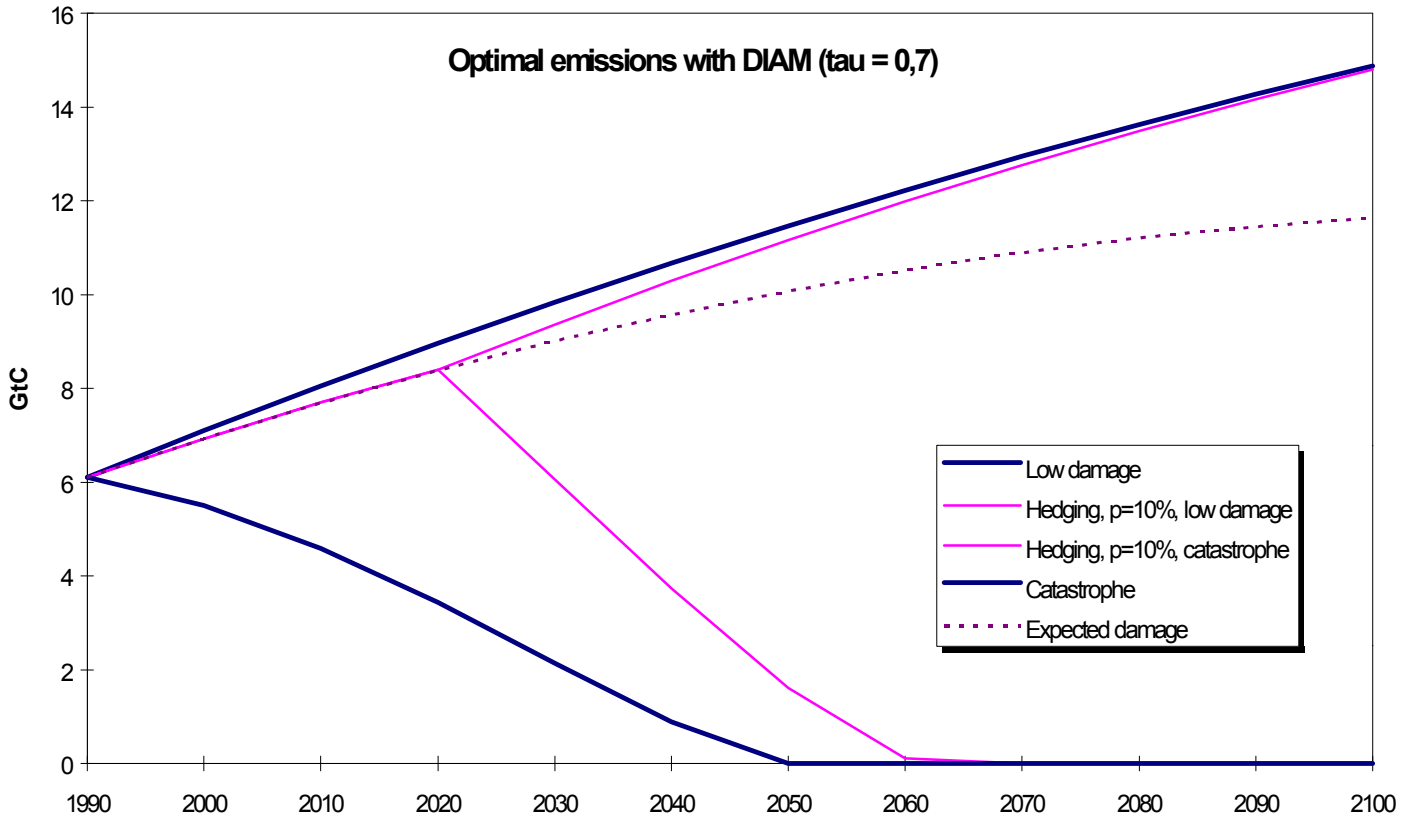
Le paragraphe qui précède a examiné les stratégies d'émission les moins coûteuses conduisant à un plafond de concentration donné par ailleurs. L'approche coût-efficacité peut être ressentie comme insuffisante, car d'une façon ou d'une autre, le choix d'un objectif de concentration résultera d'une comparaison entre l'effort que l'on est prêt à y consacrer et le bénéfice que l'on pourrait en retirer. Si un plafond de concentration semble trop difficile à atteindre, comme c'est le cas aujourd'hui pour le niveau de 400ppm, celui ci sera écarté de la négociation comme étant évidement trop coûteux à atteindre. Dans quelques décennies au rythme actuel, le niveau de 450 ppm pourrait à son tour devenir inatteignable. Dans ces conditions, le problème du timing de l'action et de l'incertitude se repose dans une approche coût-bénéfice.

Sous cet angle, le problème a reçu un premier éclairage provenant du sous groupe 'incertitude' de l'Energy Modelling Forum. Or les résultats de cette étude de l'EMF laissaient voir, au contraire de ce que nous venons de présenter, que l'incertitude n'était pas une motivation supplémentaire pour agir. Dans ce titre, nous présenterons ces résultats, avant d'examiner au titre suivant si ils persistent dans le cadre méthodologique développé dans cette thèse.

Les modèles participant à cette étude sur les "stratégies de couverture optimales", dont DIAM, étaient remarquablement unanimes. L'optimum, en présence d'incertitude, était d'adopter un comportement optimiste, et de faire comme si l'état du monde était favorable, quitte à réduire brutalement les émissions en cas de mauvaise surprise.

Le Groupe Incertitude de l'EMF 14 a proposé une approche conventionnelle des événements extrêmes[16]. Il s'agit de définir des scénarios de catastrophe, par rapport aux scénarios de base. Cela est fait en modifiant des paramètres des modèles d'après des distributions de probabilités obtenues par sondage d'expert. Dans DIAM, par exemple, Alan Manne a envisagé un dommage climatique D multiplié par 7.8 avec une probabilité de 10%. Les détails méthodologiques sont expliqués en Annexe F et Figure 6.11.

Figure 6.10 : Emissions optimales avec incertitude



Les résultats sont représentés Figure 6.10. On voit que si le dommage est "catastrophique", il convient de réduire dès a présent les émissions. Si le dommage est "normal" la trajectoire reste croissante. Le cas correspondant au dommage espéré est très proche du cas "normal". Le résultat remarquable est que la stratégie optimale se confond quasiment avec le cas moyen. Cela signifie que l'incertitude n'a pas d'influence sur la décision à court terme. Ce résultat a été retrouvé avec la plupart des modèles ayant participé à l'étude.

Nous avons vu, dans la partie théorique de cette thèse, que ce résultat pouvait provenir d'hypothèses techniques simplificatrices comme le choix d'une forme fonctionnelle particulière, ou du fait que les incertitudes sont numériquement relativement petites. Une autre interprétation est de dire que les choix modélisés sont soit tous deux parfaitement réversibles, soit tous deux parfaitement irréversibles, soit exactement aussi peu flexibles l'un et l'autre.

Ce résultat va à l'encontre de ce que nous avons montré au titre précédent, avec une certaine force puisqu'il correspond à la convergence de plusieurs modèles. Avant de le critiquer, nous allons d'abord le reproduire dans le cadre méthodologique utilisé ici.

3.2. Dommages linéaires

Afin de confirmer le résultat de la Figure 6.10, examinons une autre version du programme dynamique en coût-bénéfice dans lequel l'échelle de la fonction de dommage est stochastique. Le modèle est défini Encadré 6.2, ainsi que annexe D pour les détails techniques et le code de ce programme. Pour résumer, cette version mélange l'approche coût-bénéfice du chapitre précédent, avec le cadre stochastique développé plus haut. Les différences sont que le cycle du carbone est plus simple et qu'il y a cinq états du monde et non trois.

Dans les résultats représenté, Tableau 6.3, d_{2x} prend les valeurs {1, 1.5, 1.75, 2, 2.5} avec une distribution des p_i proportionnelle à {1, 2, 4, 2, 1}.

Ce tableau montre, dans la partie supérieure, les trajectoires optimales pour différentes hypothèses concernant le taux d'actualisation, la durée caractéristique d'évolution du système énergétique mondial et le dommage climatique. On voit que les résultats sont très sensibles au taux d'actualisation. Lorsque celui ci passe de 3% à 5%, le niveau de réduction optimal en 2020 est multiplié par 250%. L'échelle de la fonction de dommage est aussi déterminante. Selon qu'elle vaut 1 ou 2.5, le niveau de stabilisation final varie entre 407 et 679 ppmv.

Pour savoir si la décision séquentielle change quelque chose dans le comportement optimal à court terme, comparons maintenant ligne à ligne les stratégies optimales de couverture (moitié inférieure du tableau), avec les trajectoires optimales dans le cas certain (moitié supérieure). Une telle comparaison est permise pour les quatre première lignes, l'espérance du niveau de dommage climatique d_{2x} étant 1.75. Il apparaît que les niveaux de réduction optimaux en 2020 sont identiques : 17%, 20%, 6%, 8% en fonction du taux d'actualisation et de l'inertie.

Ces résultats confirment le point de vue représenté Figure 6.10 page 183 selon lequel la résolution de l'incertitude en 2020 semble ne pas jouer de rôle. La différence entre les résultats de la section précédente et les résultats de l'étude EMF 14 est bien confirmée.

Certainty scenarios t_{stab} **= 2150**	D **yr**	ρ	d_{2x} **%**	M_{stab}	x_{2020}	E_{max} **GtC**	$t_{E_{max}}$	**adj. total**	E_{cumul} **GtC**	ΔC **20 yr delay**
Reference	*60*	*3%*	*1.75*	543	**17%**	9.87	2050	39%	1101	-28%
Low inertia	*25*	*3%*	*1.75*	566	**20%**	9.92	2060	16%	1190	-25%
High discount	*60*	*5%*	*1.75*	745	**6%**	15.5	2100	58%	1930	-47%
Alternative	*25*	*5%*	*1.75*	746	**8%**	15.5	2100	30%	1923	-46%
Low damage	*60*	*3%*	*1*	679	10%	12.9	2090	38%	1662	-27%
High damage	*60*	*3%*	*2.5*	407	24%	8.68	2020	39%	540	-29%
Alt. low damage	*25*	*5%*	*1*	804	5%	17.8	2100	30%	2158	-45%
Alt. high damage	*25*	*5%*	*2.5*	688	12%	13.3	2100	30%	1688	-46%
Hedging strategies:	D **yr**	ρ	t_{info}	E_{2020} **GtC**	x_{2020}		M_{stab} 1	1.75	2.5	
Reference	*60*	*3%*	*2020*	9.39	**17%**		420	543	667	
Low inertia	*25*	*3%*	*2020*	9.04	**20%**		437	566	695	
High discount	*60*	*5%*	*2020*	10.5	**6%**		695	745	794	
Alternative	*25*	*5%*	*2020*	10.2	**8%**		691	746	802	
Late information	*60*	*3%*	*2035*	9.39	17%		430	543	656	
Early information	*60*	*3%*	*2010*				414	543	673	
Alt. early information	*25*	*5%*	*2010*				690	746	803	

Tableau 6.3 : Résultats: coût-bénéfice, dommages stochastiques linéaires

Encadré 6.2 : Équations de DIAM en coût-bénéfice stochastique, coûts linéaires

Le programme se formule ainsi, on envisage cinq états du monde avec probabilité p_i :

$$\text{Minimiser } J(\boldsymbol{x}^1, \boldsymbol{x}^2, \boldsymbol{x}^3, \boldsymbol{x}^4, \boldsymbol{x}^5) = \sum_{i=1}^{5} p_i \, J(d_{2x}(i))(\boldsymbol{x}^i)$$

Les stratégies admissibles composées de cinq profils de réduction $(\boldsymbol{x}^1, \boldsymbol{x}^2, \boldsymbol{x}^3, \boldsymbol{x}^4, \boldsymbol{x}^5)$ vérifient les contraintes:

- Stabilisation des concentrations en 2150 et au delà.
- Les cinq fonctions $\boldsymbol{x}^i$ coïncident sur $[t_0, t_{info}]$.

Pour un d_{2x} donné, l'objectif est J , somme intertemporelle actualisée des coûts de réduction et des dommages :

Equation 9 : $$J(\mathbf{x}) = \sum_{t=1990}^{2250} (1+\rho)^{-t} (D(t) + C(t)) \, dt$$

Le paramètre aléatoire $\mathbf{d_{2x}}$ représente le dommage climatique pour un forçage radiatif correspondant au doublement de la concentration de CO_2 par rapport au niveau préindustriel, soit $2M^{preindustriel} = 486$ppmv. Un retard de $\mathbf{d_{lag}} = 20$ ans est introduit pour tenir compte de l'inertie thermique des océans. Le paramètre de concentration $M^{nodamage} = 326$ ppmv est ajusté pour que les dommages en 1990 soient nuls. Les dommages augmentent au taux de 0.5% par an, avec la richesse.

Equation 10 : $$D(t) = d_{2x} \, 1.005^t \frac{M(t - 20) - 326}{486 - 326}$$

Les émissions de référence à la date t étant 6.097 (1 + 0.020266 t) , elles sont diminuées de $x(t)$ pour avoir les émissions effectives. La concentration est déterminée par une dynamique du carbone du premier ordre :

Equation 11 : $$M(t) - 278 = (M(t - 1) - 278)(1 - 1/120) + 0.386.097 (1 + 0.020266\, t)(1 - x(t))$$

Le coût de réduction est toujours représenté comme la somme du coût permanent et du coût d'ajustement, diminué par le taux de progrès technique autonome $r_{autonome} = 1\%$ par an, et proportionnel à la taille du système énergétique.

Equation 12 : $$C(t) = 1.01^{-t} (1 + 0.020266\, t) [c_a \, x(t)^2 + c_b \, [x(t) - x(t\text{-}1)]^2]$$

Les paramètres de la fonction de coût sont calibrés au moyen d'un coefficient d'inertie D, comme précédemment.

Equation 13 : $$c_a = \frac{13.7283}{6.29259 + 0.00116636\, D^2} \quad \text{et} \quad c_b = 3923 - \frac{24668.5}{6.29259 + 0.00116636\, D^2}$$

3.3. Le problème de la forme de la fonction de dommages

Pour défendre notre résultat contre cette remise en cause dans le cadre coût-bénéfice, plus général que le cadre coût-efficacité qui nous a servi à l'établir, nous ne pouvons plus en appeler au fait que les modèles utilisés dans l'étude EMF sous-estimaient peut être l'inertie du système énergétique mondial, puisque le résultat persiste avec DIAM.

Nous pouvons alors nous tourner vers la différence essentielle entre nos résultats et l'étude du sous groupe Incertitude de l'EMF, qui est la façon dont est représentée une crise climatique. Dans l'étude EMF, comme nous l'avons vu plus haut, l'aléa portait sur un facteur multiplicatif de la fonction de dommages fonction climatique. Dans les résultats de la section précédente, il s'agissait d'un seuil de concentration aléatoire, que l'on pourrait représenter comme une fonction de dommage valant zéro jusqu'à ce que la concentration atteigne ce seuil, puis sautant à l'infini au delà.

Il s'agit donc de la différence entre une représentation plutôt linéaire des dommages, et une représentation très non linéaire.

Au premier abord, on pourrait être tenté d'aller plus loin. Les fonctions de dommage climatique usuelles sont définies en général comme une puissance du réchauffement global. On pourrait les remettre en question au motif que cela implique des dommage marginal des émissions *décroissant à long terme*. En effet, si on suppose que le forçage radiatif additionnel ΔF est relié à la concentration C

de CO_2 par :

$$\Delta F = 6.3 \text{ Log}(C/C_0)$$

où C_0 est la concentration préindustrielle, environ 278ppmv, que l'augmentation de température ΔT est proportionnelle à l'augmentation du forçage radiatif, et que le dommage D est proportionnel à ΔT^n, alors :

le dommage climatique est en $[\text{Log}(C/C_0)]^n$

Le dommage marginal de la concentration est en $[\text{Log}(C/C_0)]^{n-1} / C$, il décroît puisque « le C l'emporte sur le Log à l'infini». Il en est de même du dommage marginal des émissions, en supposant une relation linéaire entre émissions et concentrations.

Toutefois, pour les ordres de grandeurs usuels, le rapport de concentration C/C_0 n'augmente pas trop, on envisage guère plus qu'un triplement de la concentration préindustrielle. Dans ces conditions, comme on le voit sur la Figure 6.11, la décroissance du dommage marginal est négligeable. Les courbes de dommages ne tournent pas de forte concavité vers le bas, il apparaît plutôt que la dérivée par rapport à la concentration des fonctions de dommage usuelles est à peu près constante.

La question de la décroissance à long terme ne se pose donc pas vraiment, mais il reste que les fonctions de dommage sont plutôt linéaires. Or, on peut penser que cette forme n'est pas cohérente avec ce qu'on sait sur la dynamique du système climatique : dommages climatiques sensibles pourraient être interprétés comme l'entrée du système climatique dans un régime de transition instable. Les décisions seraient alors prises au regard d'un dommage marginal de la pollution fortement croissant. Cette incohérence est illustrée par un détail qui pose problème dans la méthodologie utilisée dans l'étude EMF 14 et qui devrait choquer dans la Figure 6.11 : Dans la configuration où le dommage est vraiment catastrophique, il atteint déjà plusieurs dizaines de pour-cent du PIB mondial au niveau de concentration actuel.

Considérant la relative linéarité des fonctions de dommage climatique utilisées, on peut penser que la méthodologie employée jusqu'alors ne représente donc pas tous les aspects du risque d'irréversibilité associé au problème du changement climatique. Le problème n'est pas l'analyse coût-bénéfice en elle-même, mais plutôt la façon dont est représenté l'événement de petite probabilité et grande conséquence.

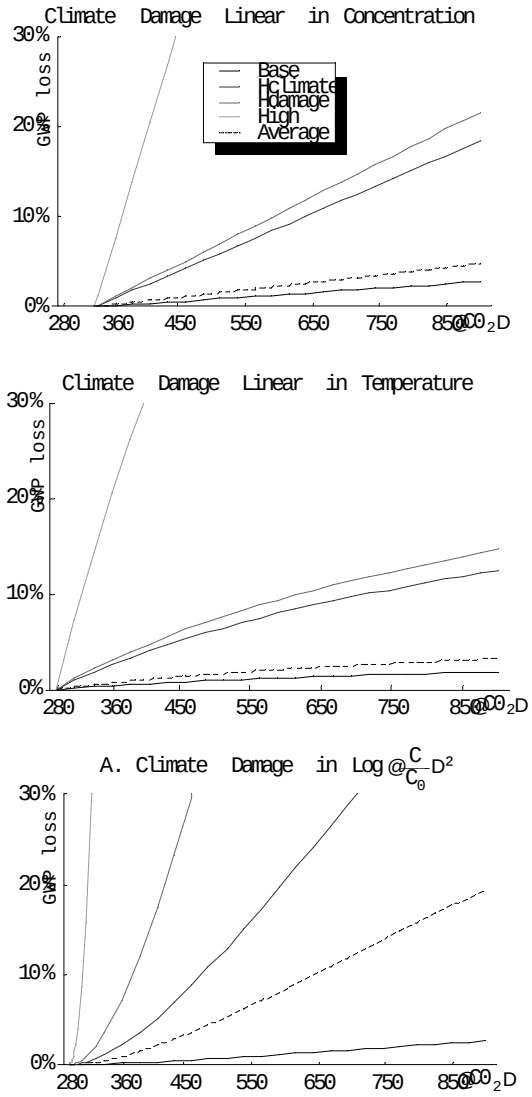
Les représentations possibles sont illustrées sur la Figure 6.12, et on peut les rapporter aux classiques différences d'interprétation de la forme d'une courbe en S. Considéré dans son début, elle peut être approchée par une parabole ou même une droite. Mais vu de loin, elle peut être approchée par un saut (fonction de Heaviside) entre une valeur «négligeable» et une valeur «catastrophique», ce qui revient dans un contexte d'optimisation à imposer une contrainte.

Pour clore ce chapitre en retrouvant les résultats de la section précédente dans le cadre coût-bénéfice de cette section, il ne nous reste plus qu'à remplacer la fonction de dommage climatique linéaire par une fonction à seuil.

Figure 6.11 : Représentations des dommages climatiques, EMF 14 study

Ces trois figures montrent comment la fonction de dommage est modifiée pour l'étude sur l'incertitude de l'EMF 14, pour trois formes de fonction de dommage : linéaire en concentration (comme dans DIAM), linéaire en température (proportionnelle au logarithme de la concentration) et quadratique en température (comme dans DICE).

Si on note ΔT_{2x} la sensibilité du climat, c'est à dire l'augmentation de la température moyenne à l'équilibre après un doublement de la concentration de CO_2 , alors dans le scénario 'Hclimate', il est recommandé d'adopter pour ΔT_{2x} une valeur 2.3° C au dessus du scénario de base. Si on appelle D *la fonction décrivant les dommages de réchauffement en fonction du réchauffement, alors dans le scénario 'Hdamage', il est recommandé de multiplier* D *par 7.8. Le scénario catastrophique 'High' combine ces deux modifications. Ces valeurs se rapportent à la moyenne du dodécile supérieur de la distribution de probabilités subjectives obtenues par sondage auprès des experts. Il convenait donc de leur affecter une probabilité 5%, les deux étant indépendants.*



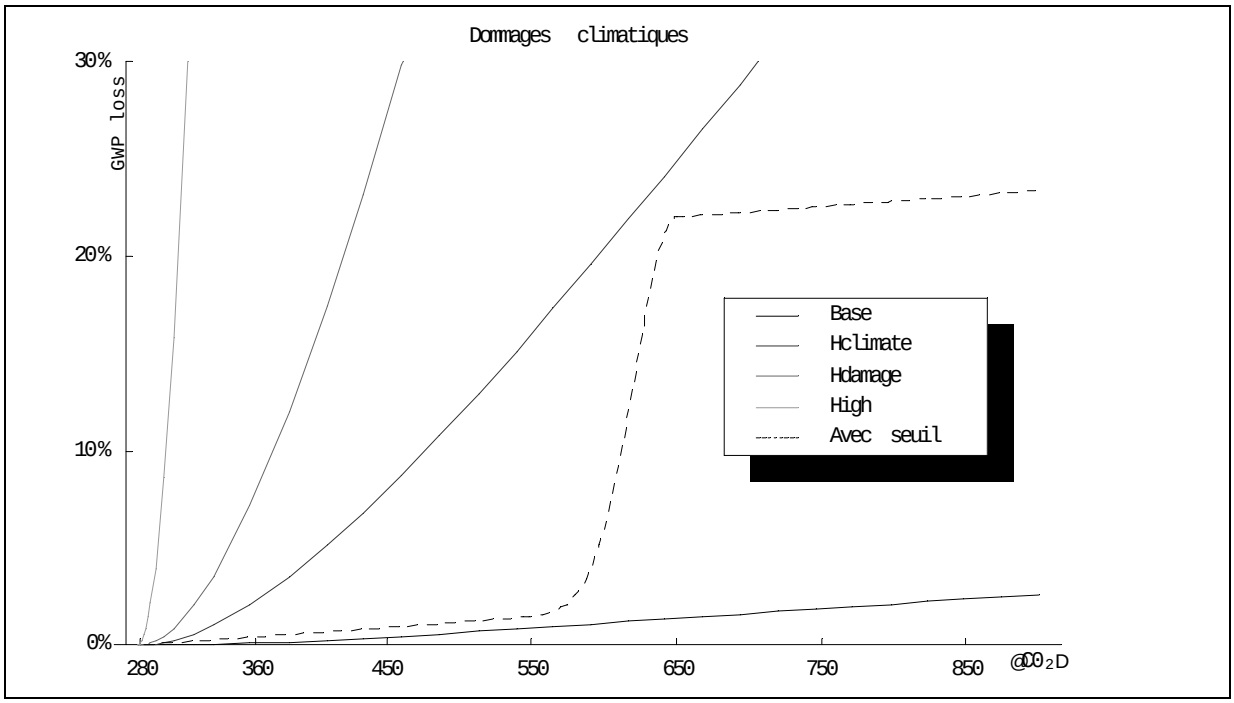


Figure 6.12 : Fonction de dommage climatique avec et sans seuil.

Cette figure compare deux façons de représenter l'incertitude sur l'impact du changement climatique. La courbe en pointillés, « en forme de S » , est fortement non linéaire. Elle est caractérisée par deux valeurs, un ***seuil*** *en dessous duquel les dommages sont négligeables, et un* ***plafond*** *qui correspond à une bifurcation catastrophique du système climatique. L'incertitude peut être représentée en jouant sur le niveau du seuil et du plafond.*

La seconde courbe correspond à une fonction de dommage quadratique en température, qui atteint 3% du PIB pour un $\Delta T = 3\%$, comme dans DICE. Celle ci n'atteint en aucun cas des valeurs catastrophiques. Pour étudier les configurations désastreuses, la courbe est multipliée homothétiquement. Toutefois, cela ne fait pas apparaître de non linéarité.

3.4. Dommages non linéaires

Nous avons donc exploré les stratégies optimales en reprenant le modèle exposé Encadré 6.2 la fonction de dommage illustrée Figure 6.12. Pour cela, nous ajoutons un terme non linéaire à la définition de *D* qui devient :

Equation 14 :
$$D = d_{2x}\, 1.005^{t}\, \frac{M(t\text{-}20) - M_0}{M_{2x} - M_0} + e^{-\left(2\, \frac{M(t\text{-}20) - M_{plafond}}{M_{seuil} - M_{plafond}}\right)^2}$$

En adoptant pour l'incertitude une équidistribution entre différents scénarios définis Tableau 6.4, on obtient les résultats représentés Tableau 6.5. Dans la partie supérieure du tableau, correspondant au cas moyen, nous remarquons que tous les scénarios stabilisent approximativement la concentration entre 450 et 550 ppmv. Cela correspond au niveau de référence des études sur l'impact du changement climatique, c'est à dite à un doublement de la concentration en équivalent CO_2 . Ce niveau de stabilisation est déterminé par le seuil de non linéarité de la fonction de dommage climatique situé à 570ppmv.

Il n'est pas surprenant que, dans le cadre coût-bénéfice, les résultats montrent que le taux d'actualisation ρ devient un paramètre déterminant à court terme, puisque avec 3% ou 5% le niveau

Tableau 6.4 : Incertitude

i	1	2	3	4	5
Probabilité p_i	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2
d^i_{2x}	1.5	1.5	1.5	1	0.5
$M^i_{plafond}$	500	550	650	750	850
M^i_{seuil}	420	470	570	670	770
T^i_{stab}	2150	2100	2150	2200	2250

Tableau 6.5 : Résultats: coût-bénéfice, dommages stochastiques non linéaires

Certainty scenarios Seuil=570, Plafond=650	D yr	ρ	D_{2x} %	t_{stab}	x_{2020}	M_{stab}				
Reference	*60*	*3%*	*1.5*	2150	**10%**	535				
Low inertia	*25*	*3%*	*1.5*	2150	**11%**	537				
High discount	*60*	*5%*	*1.5*	2150	**4%**	553				
Alternative	*25*	*5%*	*1.5*	2150	**4%**	555				
Low damage	*60*	*3%*	*0.5*	2150	6%	546				
High damage	*60*	*3%*	*2.5*	2150	15%	473				
Earlier stabilisation	*60*	*3%*	*1.5*	2100	9%	535				
Later stabilisation	*60*	*3%*	*1.5*	2200	10%	456				
Hedging strategies: equidistribution	D yr	ρ	t_{info}		x_{2020}	M_{stab}				
Reference	*60*	*3%*	*2020*		**22%**	380	451	534	612	747
Low inertia	*25*	*3%*	*2020*		**23%**	391	451	538	623	770
High discount	*60*	*5%*	*2020*		**14%**	402	465	554	644	757
Alternative	*25*	*5%*	*2020*		**15%**	407	463	555	648	777
Late information	*60*	*5%*	*2030*		17%	402	465	556	645	536

optimal de réduction en 2020 varie entre 4% et 10%. De même, il est intuitif de trouver que l'ordre de

grandeur des dommages climatiques D_{2x} , qui influe directement sur les bénéfices de l'action, a un effet sensible : la réduction optimale varie de 6% à 15% lorsque ce paramètre varie de 0.5 à 2.5.

Le résultat principal apparaît, comme dans les deux analyses précédentes, en comparant ligne à ligne la moitié supérieure avec la moitié inférieure du tableau. Les résultats concernant les stratégies optimales en univers incertain se distinguent nettement des résultats des deux sections précédentes 3.1 et 3.2. Cette fois, l'incertitude a un effet important, puisqu'elle double le niveau de réduction optimal dans le cas de référence. Avec un taux d'actualisation élevé, l'effet est encore plus sensible, le niveau de réduction passe de 4% à 14%. L'inertie ne change pas beaucoup les résultats, puisque diviser par deux la durée caractéristique du système énergétique augmente le niveau optimal de un point seulement. Par contre, l'arrivée tardive de l'information conduit à être encore plus précautionneux à court terme. Nous retrouvons donc bien les résultats qualitatifs du paragraphe 2.

D'un point de vue méthodologique, la comparaison des résultats concernant la forme de la fonction de dommage montre que la façon dont on représente les événements de faible probabilité mais de grandes conséquences est importante. Utiliser une fonction de dommage linéaire ou bien à seuil change sensiblement les stratégies optimales à court terme. Il nous semble que rester dans les hypothèses de linéarité, c'est ne pas prendre en compte l'irréversibilité.

Ce paragraphe, à l'aide d'une fonction de dommage non linéaire paramétrable, permet de jeter un pont entre les deux types d'analyses coût-bénéfice et coût-efficacité. L'analyse en coût-efficacité correspond au cas où la différence $\Delta_M = M_{seuil} - M_{plafond}$ tend vers zéro : la partie non-linéaire de la fonction de dommage devient une marche. L'analyse avec une fonction de dommage linéaire correspond au cas où Δ_M tend vers l'infini. La largeur de cette plage de concentration Δ_M , entre le niveau où la non linéarité apparaît et le niveau où elle devient catastrophique, est donc un paramètre important de l'évaluation du problème du changement climatique.

4. Conclusion : signaux et avertissement

Dans ce chapitre, nous avons examiné l'effet de l'inertie et de l'incertitude sur la question des réductions optimales à court terme.

Cette discussion à conduit à mettre en valeur le rôle d'un nouveau paramètre Δ_M, qui est la largeur de la plage de concentration entre le niveau où les dommages deviennent significatifs et celui où ils deviennent excessifs. Intuitivement, ce paramètre est important : c'est dans le laps de temps entre l'avertissement et la catastrophe que l'on peut agir. Notons P cette durée de préavis. Bien que les climatologues ne cherchent pas actuellement avec leurs modèles à quantifier ce préavis, ils assurent que le système a connu des évolutions rapides dans le passé. Il est clair que les stratégies optimales à court terme dépendent finalement de la comparaison entre ce préavis et le temps de réaction du système qui produit les émissions.

La conclusion du chapitre 5 était en quelque sorte que si on se donne pour objectif d'éviter la bifurcation climatique l'année D, étant donné l'inertie N du système socio-énergétique, alors il faut commencer au plus tard l'année T-N. Il s'agit d'examiner ce qui se passe compte tenu de l'inertie du système socio-énergétique N et du préavis dont on disposerait dans le pire des cas P. Si l'on s'attend à un préavis significativement plus court que le temps de réaction, alors il est optimal de prendre des mesures de précaution. L'apport de ce chapitre est donc que l'on se passe du D , que l'on ne savait pas déterminer, en utilisant à la place le paramètre P, qui pourrait être connu par les sciences du climat.

Ce chapitre mettant en oeuvre l'analyse en coût (certains) - bénéfice (aléatoires) étudiée d'un point de vue théorique auparavant, les résultats peuvent s'interpréter dans ce cadre en remarquant que les budgets affectés aujourd'hui en climatologie sont des investissements pour produire un bien désirable : de l'information concernant le niveau jusqu'où on peut polluer sans créer d'interférence dangereuse avec le climat. Ce bien ne sera livré que dans le futur, mais il a une valeur présente, puisque on dépense de l'argent pour l'acquérir. Le point important est que cette valeur présente change en fonction de la trajectoire d'émissions prévue aujourd'hui. C'est seulement si l'on stabilise les émissions à moyen terme que l'information « Interférence dangereuse au delà de 450 ppm » sera utile, parce qu'elle permettra de les éviter. Si on ne stabilise pas les émissions, l'information ne servira à rien parce que de toute façon, on ne pourra rien faire. Remarquons que c'est déjà le cas avec le seuil de 400ppmv.

Nous serions donc bien en présence de l' « effet d'irréversibilité », classique en économie de l'environnement : la prise en compte de l'incertitude conduit à privilégier la flexibilité à court terme en protégeant la ressource naturelle.

Cet exercice démontre la nécessité pour la recherche d'étudier avec une attention plus particulière l'impact de l'effet de serre pour des niveaux de concentrations d'équilibre entre 400 et 550 ppmv. Plus que les prédictions de l'évolution pluriséculaire du climat, cette information peut aider aujourd'hui à mieux prendre les décisions importantes qui attendent la communauté internationale.

Références bibliogaphiques

[1] Minh Ha Duong, Michael J. Grubb et Jean-Charles Hourcade, *Influence Socioeconomic Inertia and Uncertainty on Optimal CO_2-Emission Abatement,* Nature 390, 270-274, 1997. Texte complet disponible en ligne à http://www.nature.com/Magazine/Archives/SuppInfo/kyoto/kyoto270.pdf, accédé le 19/12/97.

[2] Tom M. L. Wigley., Richard Richels et Jae Edmonds, *Economic and Environmental Choices in the Stabilisation of Atmospheric CO_2 Concentrations*, Nature 379, 240-243, 1996.

[3] Richard Richels et Jae A. Edmonds, *The economics of stabilizing atmospheric CO2 concentrations*, Energy Policy, 23 (4/5), 373-378, 1995.

[4] Tom M. L. Wigley., Richard Richels et Jae Edmonds, *op. cit.*, 1996.

[5] Jae A. Edmonds, James Dooley et Marshall Wise, *The Role of Energy Technology in Atmospheric Stabilization*, in Brian P. Flannery, Klaus R. Koblhase et Duane G. LeVine (eds.), Critical Issues in the Economics of Climate Change, p. 109, IPIECA Symposium, Paris, France, 1996.

[6] *Petit Traité de Manipulation à l'Usage des Honnêtes Gens*, 1995.

[7] GIEC Working Group I, *Résumé destiné au décideurs*, §6.5 et 4.3.3, 1996.

[8] Gérard Mégie, *Incertitude scientifique et décision politique: le cas "historique" de l'ozone stratosphérique*, mimeo, 1995.

[9] Jean-Charles Hourcade, Gérard Mégie et Jacques Theys, *Politiques énergétiques et risques climatiques. Comment gérer l'incertitude ?*, Futuribles, 135, 35-60, septembre 1989.

[10] Timothy Wirth (former U.S. Under Secretary of State for Global Affairs), Bulletin of the US Embassy Information Service, Environment, 1997.

[11] Jean Charles Hourcade, *Analyse Économique et Gestion des Risques Climatiques*, Natures Sciences Sociétés, 2(3), 202-211, 1994.

[12] Alan S. Manne et Richard Richels, *Buying Greenhouse Insurance: The Economic Cost of CO2 Emissions Limits*, MIT Press, 1992.

[13] Richard Richels et Jae A. Edmonds, *The economics of stabilizing atmospheric CO2 concentrations*, Energy Policy, 23 (4/5), 373-378, 1995.

[14] Gary Hoye et Rodney Wallace, *Near Term Mitigation Policy for Global Change under Uncertainty: Minimizing the Expected Cost of Meeting Unknown Concentration Threshold*, Environnemental Modeling and Assessment 1, 47-57, 1996. Bibliographie de l'auteur à http://www.wesleyan.edu/econ/faculty/yohe.htm, accès 21/1/98.

[15] Ryan Tuccinardi, *Encyclopedia Mythica*, http://www.webcom.com/myth/articles/j/janus.html, accès 1996.

[16] Alan S. Manne, *Guidelines for scenarios*, Document de travail du EMF 14 Subgroup - Analysis for Decision under Uncertainty, d'après une note de W.D. Nordhaus, 9 juin 1995.

Chapitre 7. Changement climatique et valeur d'option

La décision séquentielle, introduite au chapitre précédent, est adaptée à l'étude des politiques climatique, puisque le problème n'est pas de choisir une trajectoire optimale pour le siècle à venir, mais de définir une stratégie raisonnable pour les prochaines décades. Nous avons alors montré comment l'irréversibilité joue un rôle d'autant plus important que l'analyse, partant de la comparaison des trajectoires d'émission à long terme, en arrive à comparer des stratégies de couverture optimale contre le risque climatique.

Dans ce chapitre, nous reprenons ce problème du rôle de l'irréversibilité dans la décision séquentielle sous un autre angle. Alors que précédemment, il s'agissait de calculer une stratégie optimale, nous allons maintenant chercher à déterminer une valeur d'option. Il s'agit de trouver une mesure monétaire explicite de l'avantage qu'il y aurait à réduire par précaution les émissions de gaz à effet de serre.

Il existe en effet dans la littérature deux courants relativement distincts entre la modélisation intégrée d'une part (dont nous avons dressé un tableau au chapitre 4) et l'analyse plus théorique autour de l'effet d'irréversibilité et la valeur d'option. Dans le premier temps de ce chapitre, montrerons en quoi le cadre théorique permet de mieux comprendre à la fois les modèles intégrés et les controverses réelles sur l'incertitude et les irréversibilités[1]. Puis nous exposerons un modèle élémentaire permettant d'analyser la décision et de définir une valeur d'option pour le problème de la modération du changement climatique. Le calcul à l'aide des fonctions de coût et de dommage utilisées dans DIAM, avec la discussion des résultats, constituera le troisième temps de ce chapitre.

1. Changement climatique et effet d'irréversibilité

1.1. L'effet d'irréversibilité

La prise de décision par les instances supérieures régulant la société[a] peut être éclairée de façon plus ou moins judicieuse par l'emploi d'outils plus ou moins formalisés. Ces outils sont variés. L'aide à la négociation, par exemple, prend peut être aujourd'hui une place croissante parmi ceux ci. Mais le premier d'entre eux reste sans doute le calcul économique. Or, même en restant dans le paradigme de la maximisation de l'utilité intertemporelle, plusieurs façons de faire du calcul économique coexistent.

⇒ *Les dimensions du problème*

Nous allons définir deux de ces « façons de faire », le raisonnement par équivalent certain et le raisonnement par programmation dynamique. Ces méthodes sont essentiellement comparables en ce qu'elles permettent toutes deux de formaliser et d'analyser des problèmes de décision séquentielle. La formalisation du problème est identique pour les deux méthodes, mais il existe plusieurs systèmes de notation, selon que l'on privilégie telle ou telle dimension du problème. On peut distinguer trois dimensions :

[a] Il s'agit du cadre historique originel. L'effet d'irréversibilité concerne aussi les décideurs privés, et joue un rôle éminent dans certains développements récent de la théorie de l'investissement (Dixit et Pindyck, 1994). Il concerne également le comportement des consommateurs : compte tenu des incertitudes toujours résiduelles sur l'utilité réelle des produits (problèmes de taille, de goûts des autres membres de la famille...), les stratégies d'achat diffèrent selon la réversibilité ou non des choix. La grande distribution a intégré cet effet pour l'éliminer en offrant une clause de 'satisfait ou remboursé'.

- La dimension du temps, puisque la décision séquentielle concerne par définition une succession de décisions. Dans l'approche la plus simple, cette dimension est réduite à deux périodes, représentant un choix à court terme et un choix futur. Un point de vue plus général peut représenter la succession en temps discret de N choix, et une troisième méthode consiste à travailler en temps continu.
- La dimension de l'incertitude et de l'information. Dans l'approche la plus simple, deux états du monde sont possibles, et l'information arrive d'un seul bloc : les probabilités subjectives ne varient pas jusqu'à ce que l'état du monde soit observé à une date *T*. L'incertitude peut être représentée de façon plus détaillée, avec N états du monde, avec des variables aléatoires continues, voire aussi, en temps continu, avec un processus stochastique. L'arrivée d'information peut aussi être représentée plus finement dans un formalisme Bayésien, en supposant que le décideur observe des signaux plus ou moins corrélés avec l'état du monde.
- La dimension des choix. Dans l'approche la plus restreinte, les choix sont binaires, cela représente par exemple un projet indivisible concernant la construction d'une grande infrastructure publique. Les choix continus, dans lequel le décideur a à fixer un niveau d'opération x , sont peut être plus utilisés dans la littérature. Notons toutefois que dans un cadre linéaire sous contrainte, le cas continu est parfois ramené au cas binaire.

L'irréversibilité et la flexibilité, de nature transversale, ne se retrouvent pas dans la notion de 'dimension' utilisée ici pour structurer la classe des problèmes de décision séquentielle. Nous resterons pour l'instant dans le système de notation le plus usuel, le français, et dans la suite nous nous placerons dans le cas le plus simple : deux choix, binaires, et deux états du monde.

⇒ *Décision séquentielle ou une fois pour toutes*

Si les deux méthodes que nous allons caractériser ci dessous posent le problème de la même façon (avec le même formalisme), elles diffèrent dans la façon de le résoudre (algorithme utilisé).

- Raisonner en équivalent certain signifie utiliser la règle : Remplacer toutes les variables aléatoires par leur espérance avant d'appliquer toute procédure de décision. Cette règle simplifie grandement le traitement des incertitudes, et son emploi est justifié lorsque celles ci sont petites[2], ou alors en première approximation. Mais elle ne prend pas en compte le fait que les choix futurs pourront être influencés par la résolution des variables aujourd'hui aléatoires, on fait comme si les décisions étaient prises *une fois pour toutes*.
- Au contraire, le raisonnement en programmation dynamique prend en compte comment l'arrivée d'information va affecter les choix futurs en *décision séquentielle*. Cela est plus approprié lorsque l'on anticipe une réduction importante des incertitudes dans un délai proche, qui pourrait impliquer une révision des choix. Mais, la méthode est notablement plus compliquée à mettre en oeuvre, même si pour des situations simples le formalisme des arbres de décision (rappelé en annexe de la thèse) permet de s'y retrouver.

Pour résumer l'avantage de chacune de ces méthodes, on pourrait dire que si l'équivalent certain est opérationnel, la programmation dynamique est, elle, plus rationnelle.

⇒ *L'effet d'irréversibilité*

Le titre précédent permet de comprendre que puisque l'équivalent certain est plus facilement mis en oeuvre que l'autre méthode, c'est elle qui sera la plus couramment utilisée, malgré que l'autre soit plus performante en théorie. Dans ces conditions, il y a un intérêt à examiner dans quelle mesure et dans quels cas l'équivalent certain conduit à prendre des décisions différentes de celles qu'on aurait prises en suivant l'autre méthode.

L'un de ces cas est celui où une des alternatives du choix à court terme est irréversible. Il s'agit par exemple de préserver ou non une ressource irremplaçable, question qui peut se poser à propos de l'industrialisation d'un site d'une grande beauté naturelle. Agir (préserver) aujourd'hui laisse ouverte

l'option d'agir ou non demain, tandis que ne pas agir est définitif. Dans ce cas, Henry[3] , simultanément à Arrow et Fisher[4], a alors montré que :

> *A risk-neutral decision maker having solved the associated riskless problem[a] more often adopt an immediate irreversible decision than does the same decision maker who has solved the initial random problem[b].*

Cette première définition de l'effet d'irréversibilité a pour implication, en pratique, que la méthode d'évaluation de projet la plus courante présente un biais défavorable à la préservation de l'environnement et des ressources naturelles.

1.2. Extensions

⇒ *Une définition plus générale*

L'effet d'irréversibilité a aujourd'hui reçu des définitions plus générales. L'irréversibilité a été élargie à la flexibilité, et l'opposition entre équivalent certain et programmation dynamique a été ré-interprétée.

Nous avons initialement présenté cette opposition comme un problème de nature calculatoire, en se demandant dans quelle mesure la première méthode, imparfaite mais utilisée en pratique, est une approximation de la seconde, plus idéale. C'est sans doute ainsi que le problème s'est originellement posé à la naissance de la programmation dynamique après la seconde guerre mondiale[5, 6].

La réinterprétation a été de formuler le résultat en termes d'arrivée de l'information, ce qui permet de retrouver l'hypothèse du décideur parfaitement rationnel. Dans un cadre qui permet de faire varier continûment la quantité d'information reçue, l'équivalent certain correspond au zéro. Il s'agit de à la situation dans laquelle est ce décideur quand il ne reçoit aucune information entre ses choix successifs, mais seulement à la fin du problème.

Nous avons discuté au premier chapitre des liens entre l'irréversibilité à la flexibilité. Dans un cadre d'optimisation sous contrainte, la flexibilité est en rapport avec la taille de l'ensemble des états atteignables à partir d'une situation donnée. Nous allons évoquer le cadre coût-bénéfice, plus riche, en relation avec la valeur d'option.

Ces deux notions permettent de donner une définition plus abstraite[7] :

> *Il y a effet d'irréversibilité lorsqu'une meilleure information entraîne un choix plus flexible.*

⇒ *Valeur de quasi-option et valeur espérée de l'information*

Les deux définitions mises en évidence ci dessus se rapportent à un « effet » qualitatif. La valeur de quasi-option est une mesure de cet effet. Cela permet de donner une définition technique :

> *Il y a effet d'irréversibilité lorsque l'on sait a priori que la valeur de quasi-option est positive.*

La valeur de quasi-option peut être définie comme une taxe qui vise à corriger le comportement du décideur utilisant l'équivalent certain. Le but de la correction est que le décideur se comporte comme si il prenait en compte l'arrivée d'information future. Une telle définition revêt toutefois une forme paradoxale[8] que l'on pourrait formuler ainsi :

> *Si on peut calculer la valeur de quasi-option, c'est qu'on n'en a pas besoin et si on en a besoin, on ne peut pas la calculer.*

La réinterprétation en termes de flux d'information permet de lever le paradoxe. De plus, comme dans une situation irréversible la valeur de l'information est nulle, cela suggère d'identifier dans ce cas la

---

[a] C'est à dire qu'il a utilisé l'équivalent certain. (nda)

[b] Par la programmation dynamique. (nda)

valeur de quasi option à la valeur espérée de l'information future[9] (abrégé en valeur de l'information dans la suite).

Cette identification pourrait permettre une approche intuitive de l'effet d'irréversibilité dans le cas d'un choix binaire : agir ou non. Il faudrait souligner pour cela que l'évaluation des choix par l'analyse coût-bénéfice en équivalent certain ne prend pas en compte la valeur de l'information. Elle ne peut donc pas représenter son abandon dans le cas irréversible, et le bénéfice attendu dans l'autre cas. Nous étendrons ces aspects plus bas dans ce chapitre.

La *valeur de l'information* est plus proche de l'entendement que la *valeur de quasi-option*, l'échange marchand d'information étant plus courant que l'échange d'options, et pourrait être empiriquement plus pratique à déterminer[10].

De plus, ce rapprochement permet d'apporter une clarification importante. La définition de la valeur de quasi-option comme mesure de l'effet d'irréversibilité tend à laisser dans l'ombre l'hypothèse centrale de gratuité et d'exogénéité de l'information. Sans elle, on peut comprendre qu'un choix moins flexible, mais apportant beaucoup d'information, peut avoir ses avantages. Plutôt que de préserver intégralement un fût de vieux vin, il peut être intéressant d'en sacrifier une partie pour savoir où il en est de sa maturation.

⇒ *Valeur d'option*

Le terme de valeur de quasi-option est d'autant plus ambigu qu'on lui substitue parfois le terme de valeur d'option, sans toujours rappeler la distinction entre les deux notions[11]. Il n'est peut être pas possible de donner une intuition générale, sans formalisme, pour expliquer la différence entre valeur d'option et valeur de quasi-option, que le GIEC[12] explique ainsi :

> *La valeur d'option est basée sur ce que les individus sont prêt à payer aujourd'hui pour la possibilité de préserver ces biens pour un usage futur (personnel) direct ou indirect. Dans un contexte d'incertitude, la valeur de quasi-option est considérée comme définissant la valeur de sauvegarder les options pour un usage futur, dans l'espoir que les connaissances - sur les bénéfices ou sur les coûts attachés à l'option - progresseront dans le temps.*

Il ressort cependant de cette citation que la valeur d'option est plus générale que la valeur de quasi-option. En effet, la littérature a examiné deux situations assurant l'existence d'une valeur d'option (positive) : l'aversion au risque et l'effet d'irréversibilité. Plus généralement, ces deux situations renvoient respectivement à deux aspects de la décision : les préférences 'subjectives' du décideur et la structure 'objectives' du problème.

Nous n'examinerons pas le premier aspect, qui amène entre autre à de nombreuses questions inter-régionales et inter-générationnelles tout à fait importantes pour l'analyse des politiques climatiques, mais hors du champ de cette thèse. Nous examinons donc comment minimiser les coûts[a], sans les transformer par une fonction d'utilité non linéaire. C'est cette hypothèse de neutralité au risque qui nous permet, semble t il, d'identifier la valeur de quasi-option et la valeur d'option dans le modèle spécifié plus bas.

1.3. Application aux modèles intégrés

⇒ *Rappel des deux irréversibilités*

Dans le cas du changement climatique, l'accumulation du CO_2 est irréversible. Son accumulation épuise une ressource naturelle : le climat. L'intuition de l'effet d'irréversibilité suggère que les modèles intégrés d'optimisation non stochastique tendent à surestimer les émission optimales.

Nous avons expliqué dès l'introduction que cette intuition est insuffisante. Contrairement à l'exemple

[a] Notons toutefois que en pratique, le processus d'agrégation des coûts fait intervenir des considérations inter-régionales et inter-générationnelles.

de la construction d'une grande infrastructure sur un site naturel, dans le problème du changement climatique l'irréversibilité environnementale s'oppose à l'irréversibilité des investissements. Cette dernière souligne l'intérêt d'attendre pour avoir plus d'information au lieu d'investir aujourd'hui, peut être inutilement.

Les deux irréversibilités ayant des effets opposés, un recours aux modèles intégrés permet de tenter de quantifier ces effets et d'évaluer si l'un ou l'autre domine. Toutefois, les modèles intégrés estompent le caractère idéal de cette dialectique entre deux irréversibilités absolues[a]. Le CO_2 s'accumule mais est lentement absorbée par les océans, l'irréversibilité physique est représentée par une équation dynamique. Le capital est constamment renouvelé, et l'irréversibilité des investissement peut être, comme dans DIAM, capturée par les coûts d'ajustement et non par une contrainte.

⇒ *De l'effet au principe*

Pour interpréter le résultat d'un modèle empirique particulier dans les termes de la dialectique théorique générale sur les deux effets d'irréversibilité, il est nécessaire d'opérer un renversement sémantique.

- La littérature théorique a montré en quoi l'effet d'irréversibilité (une meilleure information implique un choix plus flexible) était une intuition bien fondée, en déterminant des classes générales de situations pour lesquels celui ci était vérifié.
- Il est alors possible d'exploiter cette intuition, en posant l'effet d'irréversibilité comme un principe. On fait varier les paramètres d'un modèle dans le sens d'une meilleure information, et on interprète le nouveau résultat comme plus flexible que l'ancien.

Si, lorsque la date de résolution des incertitudes se rapproche, les émissions optimales à court terme diminuent, on pourra en ce sens dire qu'agir pour préserver la ressource climatique est plus flexible qu'attendre.

⇒ *Interprétation du principe*

Pour nous, l'irréversibilité environnemental domine l'irréversibilité d'investissement lorsque :

> *La stratégie optimale en décision séquentielle conduit à moins polluer à court terme que la stratégie optimale en équivalent certain.*

Cette définition, qui correspond à l'approche originelle, peut être généralisée. Il aurait aussi été légitime de poser qu'il y a effet d'irréversibilité (en sous entendant « environnemental ») lorsqu'une meilleure information conduit à polluer moins à court terme.

Mais un cadre trop général, ne précisant pas la notion de meilleure information, rend plus difficile la comparaison des résultats entre les modèles. En effet, plusieurs définitions différentes de cette notion existent. Sans entrer dans le cadre Bayésien, qui permet de paramétriser de multiple façons la qualité du signal observé, la plupart des modèles intégrés représentent une meilleure information par une information plus précoce (voir p. 194). Or on peut donner trois sens à cette dernière expression, qui correspondent à trois exercices différents.

- Le rapprochement de la date de résolution des incertitudes, par exemple entre $T_B = 2030$ et $T_A = 2020$.
- Comparer une résolution virtuelle des incertitudes aujourd'hui en $T_A = 1990$ avec la résolution supposée réelle des incertitudes en $T_B = 2020$ permet de calculer la valeur (espérée) de l'information (présente) parfaite, notée EVPI dans la littérature. Cette comparaison correspond à la dichotomie 'Act Then Learn' (ATL, agir puis apprendre, pour T_B) , et 'Learn Then Act' (LTA,

[a] Dans l'introduction, nous avons été ammenés à définir ce terme et à le distinguer de l'irréversibilité des choix, qui reste appliquable aux modèles empiriques.

apprendre puis agir, pour T_A).

- Comparer la décision séquentielle (programmation dynamique) avec la décision 'une fois pour toutes' (en équivalent certain) correspond à la comparaison entre la résolution des incertitudes en T_A = 2020 et une situation où les incertitudes sont résolues seulement à très long terme, T_B = 2200.

⇒ *Avantages de la comparaison séquentiel - une fois pour toutes*

C'est le troisième cas qui nous intéresse ici. Il présente en particulier deux avantages.

Premièrement, il permet d'accéder à la valeur de l'information future, notion réelle, par opposition à la valeur de l'information présente qui est une notion virtuelle. Si nous soulignons ici cette opposition entre réalité de l'information future, puisque l'on s'attend effectivement à recevoir de l'information, et virtualité de l'information présente, on ne peut pas y accéder, c'est parce qu'une part importante de la recherche s'est intéressée à l'EVPI sans considérer l'autre valeur.

On peut tenter d'accéder à un ordre de grandeur de la valeur de l'information future, en estimant ce que la recherche sur le changement climatique coûte à la société. Le GIEC implique plusieurs milliers de chercheurs, et dans les contrats européens, un mois de chercheur correspond à sept mille écus. On peut par exemple estimer que cinq à dix mille chercheurs sont financés à la hauteur de cinquante à cent mille écus par an, ce qui correspond à une annuité de deux cent cinquante à mille millions d'écus par an.

Cet évaluation semble constituer une borne inférieure, par comparaison aux crédits (dépenses ordinaires + crédits de paiement) inscrits au titre de la recherche au budget français « Éducation nationale, recherche et technologie » qui s'élèvent à 39,6 milliards de francs, en 1997.

⇒ *Résultats des modèles à vocation empirique*

Un second avantage du cadre choisi ici est qu'il peut être appliqué à la comparaison entre les modèles intégrés déterministes et les modèles intégrés stochastiques. Cette comparaison à une valeur certaine, dans la mesure où les deux sortes de modèles servent dans la pratique et il est donc scientifiquement utile de connaître leur relation. En particulier, il serait intéressant de confirmer sur des bases systématiques la remarque du GIEC[13] :

> *Les évaluations coûts-bénéfices axées sur l'incertitude qui ont été effectuées jusqu'à ce jour arrivent à des taux de réduction optimaux plus élevés que ces modèles coûts-bénéfices déterministes.*

Cette remarque peu en effet sembler peu probante, compte tenu de la nature du sujet et des différences inter modèles, la comparaison des modèles stochastiques avec les modèles déterministes. En comparant seulement les différences entre la versions déterministe et la version stochastique d'un même modèle, on met mieux en lumière l'effet intrinsèque de l'incertitude et de l'irréversibilité.

Cette comparaison peut être systématisée, car les modèles intégrés qui calculent la stratégie optimale en décision séquentielle permettent aussi de calculer la trajectoire optimale prise 'une fois pour toute'.

Les pionniers dans l'analyse de la décision séquentielle, Manne et Richels[14] se sont concentrés sur la différence ATL-LTA. En supposant que l'information arriverait en 2020, ils ont calculé la stratégie optimale compte tenu d'une incertitude sur la réduction des émissions de CO_2 pouvant être -50% (avec probabilité 16%) , -20% (probabilité 24%) et sans restriction (probabilité 60%). Mais leur étude du cas déterministe correspond seulement au cas sans restriction, qui ne correspond pas à un équivalent certain. On retrouve là le problème de l'analyse coût efficacité évoqué au chapitre précédent, et en conséquence, leurs résultats publiés ne permettent pas d'obtenir une valeur d'option.

DICE semble présenter un effet d'irréversibilité puisque introduire l'incertitude augmente la réduction optimale à court terme de 50%. Nordhaus conclut[15]

> *« First the optimal control rates that emerge from the more complete analysis including uncertainty and realistic constraints on the resolution of uncertainty do not differ markedly from the results of the simplest, best-guess models. Second, the optimal carbon tax in this more complete analysis is much*

higher than in the best-guess analysis, but the major reason for the increase comes from introducing uncertainty rather than considerations of the timing of resolution of uncertainty.».

La relative ambiguïté de ce passage ne se retrouve pas dans le modèle CETA[16], pour lequel il apparaît qu'en ce qui concerne les émissions de CO_2 à court terme (20 ou 40 ans) :

« optimal policies are roughly the same regardless of how uncertainties are resolved ».

En somme, ces modèles intégrés n'ont pas mis en évidence, ou n'ont pas été utilisés pour mettre en évidence (cas du modèle CRPS[17]) l'effet d'irréversibilité.

⇒ *Résultats des modèles spécifiques*

Pourtant, à côté de ces modèles intégrés, des résultats plus théoriques concernant la décision séquentielle dans le cadre du changement climatique, sont assez nombreux. Il est même utile de se limiter à ceux concernant directement les irréversibilités.

Ayant ainsi exclu du champ le thème des préférences subjectives du décideur, nous ne nous attarderons pas sur des travaux tels que Treich[18], ou Beltratti, Chichilniski et Heal[19]. Nous passerons également sur les résultats concernant en premier lieu l'apprentissage (arrivée d'information) et non sur l'irréversibilité comme ceux d'Eismont et Welsch[20], ou Torvanger[21], ainsi que sur le modèle de Dixit et Pindyck[22], affirmé comme seulement illustratif.

Il apparaît alors deux sources convergentes pour montrer que :

« for most parameter values current abatement of emissions of greenhouse gases should be lower when we allow for the possibility of obtaining better information. »

Ce résultat de Ulph et Ulph[23] , qui ne justifie pas d'attendre l'information sans rien faire contre le changement climatique, va tout de même dans le sens d'une modération de l'importance de l'irréversibilité environnementale devant l'irréversibilité d'investissement. La différence de réduction optimale entre décision séquentielle et décision une fois pour toute est toutefois assez faible, de l'ordre de 1 point de pourcentage en valeur absolue dans la majorité des cas étudié. Cette différence est maximale lorsque le taux d'actualisation est faible et le dommage climatique très élevé dans l'hypothèse défavorable, et atteint 20% en valeur relative.

Kolstad est l'auteur ayant le plus explicitement posé la question de la comparaison des irréversibilités. Plusieurs de ses travaux[24, 25, 26, 27] basés entre autre sur le modèle DICE comme nous l'avons vu au chapitre 4, lui ont permis de conclure que :

« the irreversibility of investment capital has a stronger effect than irreversibilities in climate change (other than catastrophic effects) ».

Ce survol de la littérature existante laisserait présager que les résultats de DICE pourraient se retrouver relativement isolés, si la littérature théorique qui montre qu'introduire l'incertitude tend à diminuer les réductions optimales à court terme est confirmée. Le chapitre précédent laissait pourtant entrevoir, avec un modèle empirique, une confirmation de la pertinence d'une attitude de précaution par rapport au changement climatique. Dans la suite, nous allons tenter de clarifier les analyses théoriques, dans le sens d'une meilleure compréhension de ce qui contribue, ou non, à une valeur d'option positive pour la protection de l'environnement.

2. Cadre formel d'analyse de la décision

Le paragraphe précédent nous a permis de montrer que l'effet d'irréversibilité ne caractérise pas tous les modèles du changement climatique, tant au niveau théorique qu'empirique.

Nous avons aussi introduit la valeur d'option comme la mesure de l'effet d'irréversibilité, que nous avons défini ici comme le fait qu'une approche séquentielle de la décision implique plus de précaution (moins de pollution à court terme) qu'une approche qui considère les décisions prises une fois pour toutes.

Dans cette section, nous présentons le modèle formel élémentaire de la théorie qui précède. Ce modèle va nous permettre de re-démontrer l'effet d'irréversibilité et de définir précisément la relation Valeur d'Option et sa relation avec la Valeur Espérée de l'Information Future (EVFI).

2.1. Arbres du problème

Le modèle analyse en terme de théorie de la décision le débat scientifique exposé au chapitre précédent à propos de la controverse WRE contre WGI. Nous proposons un cadre formel élémentaire, la décision séquentielle est réduite à deux choix binaires, avec incertitude sur deux états du monde possibles. Rappelons également que nous considérerons l'irréversibilité des choix, c'est à dire comme l'influence d'un choix à court terme sur les conditions du choix à long terme (asymétrie des coûts), et non l'irréversibilité absolue.

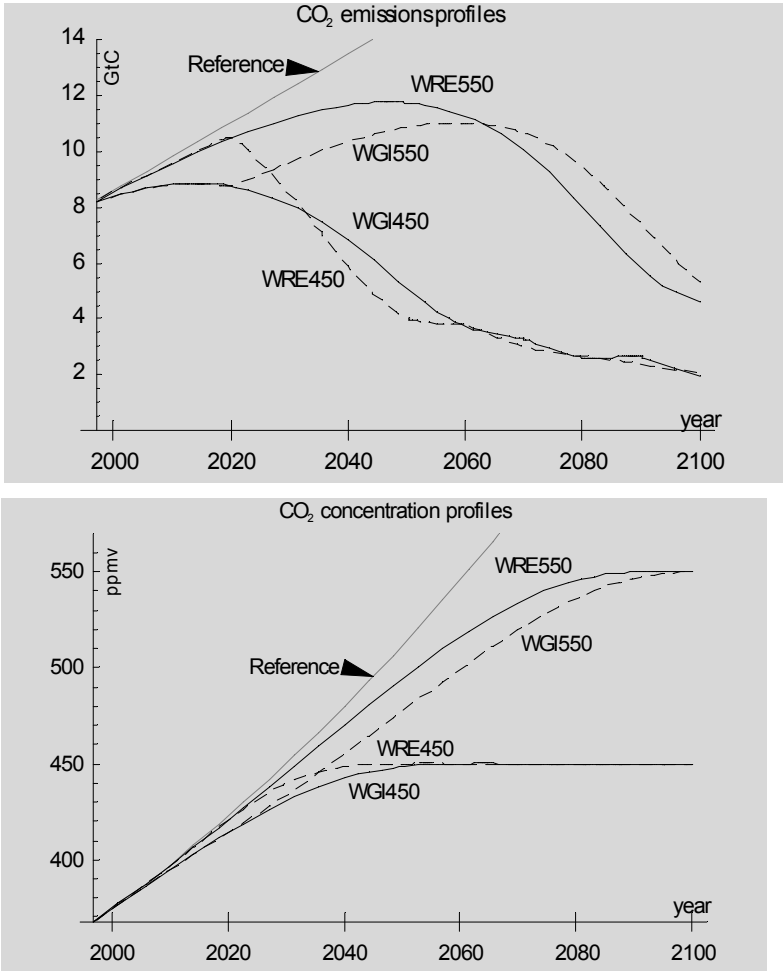


Figure 7.1 : Quatre scénarios de CO_2 pour le XXIe siècle

Ces quatre profils temporels minimisent le coût de réduction des émissions comme spécifié dans DIAM, sous les contraintes suivantes:

WRE550 respecte un plafond de concentration 550 ppmv

WGI450 respecte un plafond de concentration 450 ppmv

WRE450 respecte un plafond de concentration 450 ppmv et coïncide avec WRE550 pour $t \leq 2020$

WGI550 respecte un plafond de concentration 550 ppmv et coïncide avec WGI450 pour $t \leq 2020$

La Figure 7.1 illustre le problème de décision considéré ici. D'une façon très stylisée, nous réduisons

le problème des politiques climatiques un choix à court terme et un choix à long terme, chacun se faisant entre deux alternatives. Il s'agit donc de choisir une trajectoire x parmi les quatre possibilités représentées.

- A court terme, il s'agit d'opter pour une réduction agressive (représentée par les trajectoires de type WGI) ou modérée (trajectoires de type WRE) des émissions de CO_2 pendant les deux prochaines décennies. Notons α le choix à court terme (α = WRE ou WGI)
- Le choix sur le long terme, fait en 2020, fixe un plafond à l'augmentation de la concentration atmosphérique de CO_2. Stabiliser cette concentration à 450 ppmv exigera évidement plus d'efforts que de stabiliser à 550 ppmv, mais en contrepartie le changement climatique sera aussi moins intense.
- L'état du monde aléatoire, noté $\tilde{a}$, peut prendre deux valeurs possibles : impact climatique faible ou élevé. La probabilité p des dommages élevés, cas noté a^+, et la probabilité $1 - p$ du cas climatiquement favorable a^- sont supposées connues.

Rationnellement, l'arbitrage initial sur α, puis celui entre les plafonds 450 et 550 se feront en faveur de celui qui minimise le coût total espéré (coûts de réduction des émissions + dommages climatiques), noté $TC(a, x)$ dans la suite. Les deux cadres décisionnels sont :

- Le cas du choix *une fois pour toutes* : Dans ce cas, on suppose que les décideurs réfléchissent comme si ils devaient choisir aujourd'hui un plafond de concentration. Dans ce cas, l'arbitrage ne pourrait porter que sur les valeurs espérées des coûts et des bénéfices correspondants aux divers plafonds : il s'agit du cas équivalent certain.
- Le cas du choix en *décision séquentielle* : On suppose ici que les décideurs diffèrent la décision de long terme (plafond de concentration) jusqu'à ce qu'ils disposent d'information scientifique et technique appropriée (dans le modèle, en 2020). Il s'agit du cas en programmation dynamique.

En suivant la réinterprétation en termes d'arrivée d'information, le premier cas correspond à une résolution des incertitudes après le choix à long terme, alors que le second suppose que l'on en saura assez à propos des possibilités de dommage climatique élevé avant 2020.

Compte tenu de la loi de Moore[a], on peut s'attendre à ce que la résolution spatio-temporelle des modèles de circulation générale océan-atmosphère soit multipliée par 8 en 18 ans. A ce terme, les grandes incertitudes sur la science du climat pourraient avoir considérablement diminué. Le cadre de la décision séquentielle semble donc plus proche de la réalité que celui de la décision une fois pour toutes.

La Figure 7.2 résout, formellement, le problème posé ici dans les deux cadres décisionnels mis en évidence.

[a] Le nombre de transistors sur une puce double tous les 18 mois.

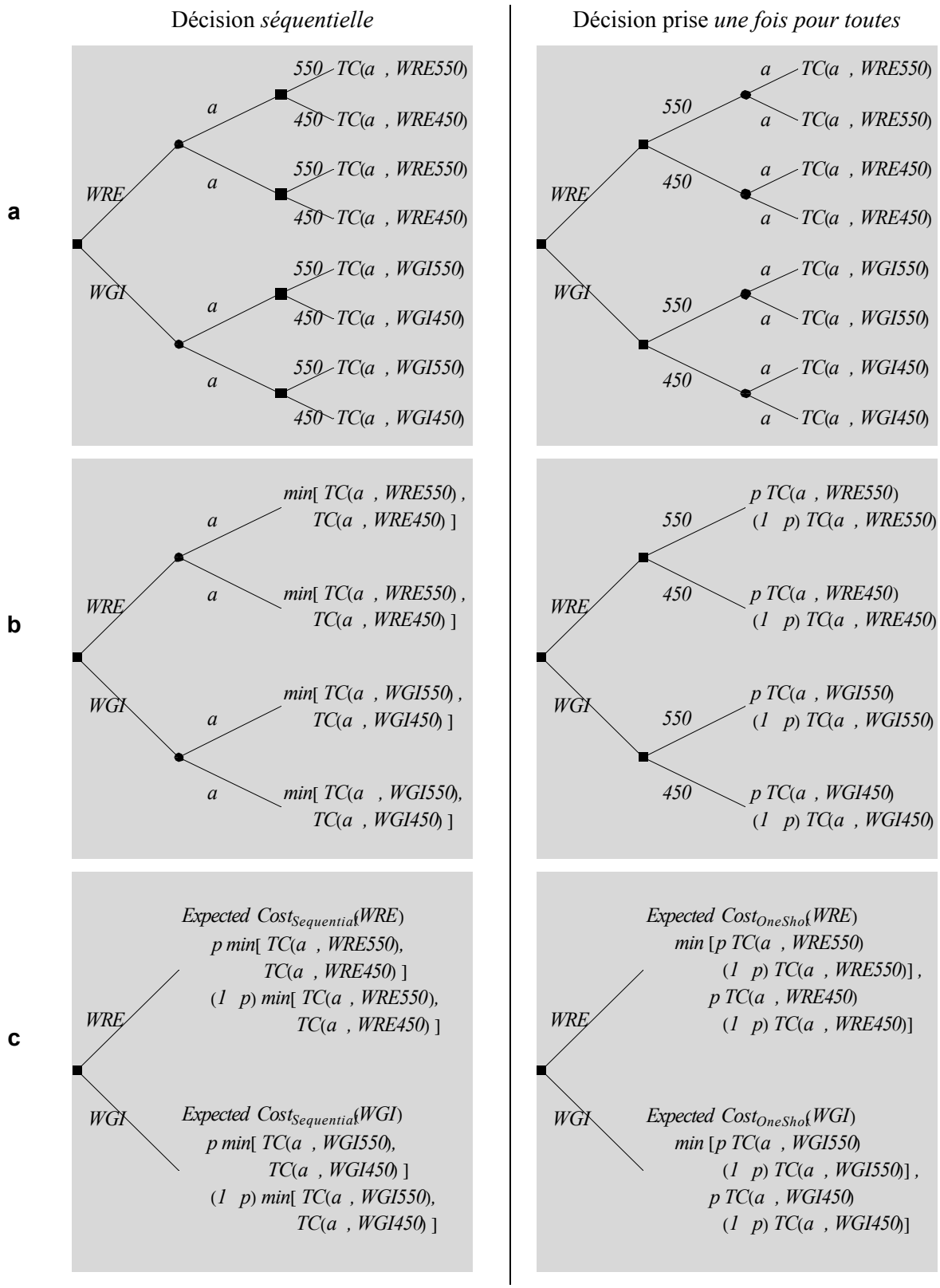


Figure 7.2 : Analyse de la décision WRE ou WGI, calcul des coûts espérés

2.2. L'effet d'irréversibilité

Dans cette section, nous allons re-démontrer l'effet d'irréversibilité. Pour cela, nous devrons supposer que l'une des deux alternatives α = WRE ou WGI est en fait un choix irréversible. Pour rester dans l'intuition environnementale, nous supposerons que c'est WRE qui est irréversible, c'est à dire que si l'on ne préserve pas la ressource avec une réduction agressive des émissions dès 1990, alors il ne sera plus possible de respecter le plafond de 450 ppmv.

Représenter ce « *ne sera plus possible* » équivaut formellement à supposer que le profil WRE450 n'est « *en aucun cas souhaitable* », c'est à dire que *TC*(*a*, WRE450) est très grand quel que soit *a*. L'exemple peut être justifié en invoquant les coûts d'ajustement autour de l'année 2020, c'est à dire les grandes perturbations socio-économiques afférentes à une réduction rapide des émissions. Dans le cadre de décision en choix discrets utilisé ici, il n'y aurait pas d'autre alternative en 2020 que de viser 550ppmv. C'est en ce sens que, dans cette section, partir sur une trajectoire de type WRE est un choix (économiquement) irréversible.

Nous pouvons alors prouver que l'effet d'irréversibilité a lieu, c'est à dire que :

Quelle que soit la probabilité p et la fonction de coût TC, le raisonnement en équivalent certain conduit à préférer WRE plus souvent que le raisonnement en décision séquentielle.

Démonstration :

Pour montrer que le raisonnement en équivalent certain favorise systématiquement WRE, nous allons examiner le coût d'opportunité de WGI par rapport à WRE, et montrer que l'équivalent certain majore ce coût.

Le coût d'opportunité des réduction agressives à court terme (α = WGI), est par définition la différence entre son coût espéré et le coût espéré de l'alternative WRE (Equation 7.1). Ce coût d'opportunité est positif quand et seulement quand WRE est un meilleur choix que WGI :

Equation 7.1 $$\text{Opportunity Cost}_i(\text{WGI}) = \text{Expected Cost}_i(\text{WGI}) - \text{Expected Cost}_i(\text{WRE})$$

Ce coût est indexé par *i* , qui représente le cadre décisionnel. Celui ci peut être soit *i* = *Sequential* (décision séquentielle), soit *i* = *OneShot* (décision prise une fois pour toute).

Il s'agit de montrer que indépendamment de *p* et de *TC*, on a :

Equation 7.2 $$\text{Opportunity Cost}_{Sequential}(\text{WGI}) \leq \text{Opportunity Cost}_{OneShot}(\text{WGI})$$

Utilisons les résultats de la Figure 7.2, ligne **c**, en tenant compte du fait que *TC*(*a*, WRE450) est grand pour simplifier Expected Cost$_i$(WRE). Il vient :

$$\begin{aligned}
&\text{Opportunity Cost}_{Sequential}(\text{WGI}) = \\
&\quad p\ \min[TC(a^+, \text{WGI550}),\ TC(a^+, \text{WGI450})] + \\
&\quad (1-p)\ \min[TC(a^-, \text{WGI550}),\ TC(a^-, \text{WGI450})] - \\
&\quad (\ p\ TC(a^+, \text{WRE550}) + (1-p)\ TC(a^-, \text{WRE550})\ )
\end{aligned}$$

et

$$\begin{aligned}
&\text{Opportunity Cost}_{OneShot}(\text{WGI}) = \\
&\quad \min[\ p\ TC(a^+, \text{WGI550}) + (1-p)\ TC(a^-, \text{WGI550}),\ \\
&\qquad p\ TC(a^+, \text{WGI450}) + (1-p)\ TC(a^-, \text{WGI450})\ ] - \\
&\quad (\ p\ TC(a^+, \text{WRE550}) + (1-p)\ TC(a^-, \text{WRE550})\ )
\end{aligned}$$

Pour simplifier l'écriture, et puisque nous voulons l'indépendance par rapport à *p* et à *TC*, posons :

$x_1 = p\ TC(a^+, \text{WGI550})$ $\qquad$ $x_2 = p\ TC(a^+, \text{WGI450})$

$x_3 = (1-p)TC(a^-, \text{WGI550})$ $\qquad$ $x_4 = (1-p)\ TC(a^-, \text{WGI450})$

$x_5 = (\ p\ TC(a^+, \text{WRE550}) + (1-p)\ TC(a^-, \text{WRE550})\ )$

Il vient :

$\text{Opportunity Cost}_{Sequential}(\text{WGI}) = \min[x_1,\ x_2] + \min[x_3,\ x_4] - x_5$

$\text{Opportunity Cost}_{OneShot}(\text{WGI}) = \min[x_1 + x_3,\ x_2 + x_4] - x_5$

La structure mathématique apparaît alors clairement, nous allons utiliser le fait que la somme des minima est plus petite que le minimum des sommes. Pour tout quadruplet (x_1, x_2, x_3, x_4) on a l'identité[a] :

Equation 7.3 $\qquad \min[x_1,\ x_2] + \min[x_3,\ x_4] \leq \min[x_1 + x_3,\ x_2 + x_4]$

D'où il découle que l'Equation 7.2 est vérifiée.■

La démonstration permet en outre d'affirmer que le signe de l'expression définie par Equation 7.4 est positif. Il s'agit de la valeur d'option d'une réduction agressive des émissions (WGI).

Equation 7.4 $\qquad \text{OV}(WGI) = \text{Opportunity Cost}_{oneshot}(WGI) - \text{Opportunity Cost}_{sequential}(WGI)$

Ayant démontré l'effet d'irréversibilité et défini la valeur d'option dans le cadre du modèle élémentaire décrit ici, nous allons retourner au cas général dans lequel on ne suppose plus que WRE est irréversible.

[a] Cette identité se montre ainsi, en utilisant $a \vee b$ pour noter le minimum de a et de b :

Par définition, $a \vee b \leq a$ et $c \vee d \leq c$, en additionnant ces deux inégalités, il vient $(a \vee b) + (c \vee d) \leq a + c$

Par définition, $a \vee b \leq b$ et $c \vee d \leq d$, en additionnant ces deux inégalités, il vient $(a \vee b) + (c \vee d) \leq b + d$

Et un nombre $(a \vee b) + (c \vee d)$ inférieur à deux autres $a + c$ et $b + d$ est inférieur au plus petit de ces deux autres $(a+c) \vee (b+d)$. ■

2.3. La valeur d'option et de l'information

Le but ultime de l'analyse est d'éclairer les condition du choix entre les politiques à court terme de type WRE et celles de type WGI. D'une façon économiquement rationnelle, nous avons comparé les coûts espérés de chacune des alternatives, pour chacun des deux cas *Décision séquentielle* et *Décisions prises une fois pour toutes*. Cette comparaison nous conduit à disposer les espérances des coûts dans le Tableau 7.1 à deux lignes (*i* = *Décision séquentielle* ou *Décisions prises une fois pour toutes*) et à deux colonnes (α = WGI ou WRE).

Notons que les quatre cases centrales de ce tableau reprennent la disposition de la Figure 7.2, ligne **c**. Ce tableau permet une présentation commode de la définition des notion clés de coûts d'opportunité, valeur d'option et valeur espérée de l'information future.

⇒ *Valeur de l'information future (EVFI)*

Rappelons que la décision séquentielle s'interprète comme une décision avec information, et la décision prise une fois pour toute correspond à un cas sans information. La valeur espérée de l'information future (EVFI) est par définition la différence entre le coût *sans l'information* moins le coût *avec l'information* (Equation 7.5). Elle apparaît dans une lecture verticale du Tableau 7.1. Il est intuitif que l'EVFI est toujours positive, ce qui découle mathématiquement de l'identité Equation 7.3.

Equation 7.5 $$\text{EVFI}(\alpha) = \text{Expected Cost}_{oneshot}(\alpha) - \text{Expected Cost}_{sequential}(\alpha)$$

Il importe de noter que l'EVFI n'a pas de raison d'être identique dans les deux colonnes. Pour insister sur cette conditionalité par rapport au choix à court terme considéré, nous la noterons dans la suite EVFI(α) , et α désignera un choix initial WRE ou WGI.

La valeur d'option, en bas à droite du Tableau 7.1, peut aussi être définie comme la différence des EVFI. L'Equation 7.6 et l'Equation 7.4 sont ici équivalentes.

Equation 7.6 $$\text{OV(WGI)} = \text{EVFI(WGI)} - \text{EFVI(WRE)}$$

	Décision *séquentielle*	Décision prise *une fois pour toutes*	*différence one shot - sequential*
WRE	Expected $\text{Cost}_{sequential}$(*WRE*)	Expected $\text{Cost}_{one\ shot}$(*WRE*)	*Expected Value of Future Information(WRE)*
WGI	Expected $\text{Cost}_{sequential}$(*WGI*)	Expected $\text{Cost}_{one\ shot}$(*WGI*)	*Expected Value of Future Information(WGI)*
différence WGI - WRE	*Opportunity* $\text{Cost}_{sequential}$*(WGI)*	*Opportunity* $\text{Cost}_{one\ shot}$*(WGI)*	*Option Value(WGI)*

Tableau 7.1 : Coûts espérés et définition de la valeur d'option.

Ce tableau permet de lire la définition de la valeur d'option (en bas à droite) de deux manières différentes, soit comme la différence des coûts d'opportunité, soit comme la différence des valeurs de l'information future. Le tableau représentant des pertes et non des gains, on fait la différence du cas Décision prise une fois pour toutes moins Décision séquentielle, à l'opposé de Fisher & Haneman (1990), par exemple. Le cas Décision séquentielle correspond à la situation 'act then learn' (ATL) dans Manne and Richels (1992). Le cas Décision prise une fois pour toutes s'oppose à la situation 'learn then act' (LTA). Il s'agit plutôt d'une situation 'never, learn'.

⇒ ***Valeur de l'information***

Fisher et Hanemann[28] soulignent que la valeur d'option dépend du choix initial α en disant que « *the option value is a conditional value of information »* . Hediger[29] note qu'il s'agit d'une différence de valeurs de l'information : « *option value is the opportunity cost of not-learning, or giving up future information*. »

Il apparaît que la valeur d'option n'est pas la valeur de l'information, mais sa variation. Mais dans le cas particulier où l'une des alternatives est irréversible, alors il y a identité entre les deux valeurs puisque l'EVFI est nulle. Si par exemple WRE est irréversible comme à la section précédente, on a EVFI(WRE) = x_5 - x_5 = 0, et donc OV(WGI) = EVFI(WGI).

Nous pouvons maintenant souligner d'autres avantages[a] de la valeur de l'information par rapport à la notion de valeur d'option. L'EVFI(α) est intrinsèque au choix α, alors que la valeur d'option se définit comme une différence. La valeur de l'information permettrait donc peut être d'examiner plus symétriquement un nombre d'alternatives quelconques.

De plus, l'EVFI(α) montre clairement que la valeur d'option est attachée aux bénéfices futurs de la flexibilité, qui sont indépendants de ses coûts à court terme. Ce point n'était pas transparent dans l'Equation 7.4, qui faisait intervenir les coûts d'opportunité intertemporels.

On peut alors comprendre plus facilement pourquoi l'importance relative de la valeur d'option, définie par le ratio *r* de l'Equation 7.7, n'est pas théoriquement limitée entre 0 et 100%, mais peut prendre des valeurs positives ou négatives, plus grandes ou plus petites que 1 en valeur absolue. C'est parce que le dénominateur peut varier indépendamment du numérateur, en fonction de la différence de coûts à court terme entre WRE et WGI[b].

Equation 7.7

$$r = \frac{\mathrm{OV}(\alpha)}{\text{Opportunity Cost}_{one\ shot}(\alpha)}$$

Dans ce ratio, le signe du numérateur indique si il y a effet d'irréversibilité environnemental. C'est le cas si OV(WGI) est positif ou, ce qui revient au même puisqu'on passe à l'opposé, OV(WRE) est négatif. Dans le cas contraire, c'est l'effet d'irréversibilité d'investissement qui domine.

Le signe du dénominateur indique quelle alternative serait choisie par un décideur raisonnant en équivalent certain : il choisirait WRE si le coût d'opportunité de WGI était positif.

Lorsque le ratio est négatif, l'effet d'irréversibilité tend à renforcer le choix de ce décideur. A zéro, la valeur d'option est nulle. Entre zéro et un, la valeur d'option diminue l'avantage que ce décideur retire de son choix mais pas au point de le renverser. A un, le décideur en séquentiel serait indifférent aux deux alternatives. C'est seulement si le ratio est plus grand que l'unité que les deux décideurs feraient un choix différent.

3. La valeur d'option

Ce paragraphe se divise en deux sections. La première procède d'une analyse théorique, nous allons classer les problèmes de décision par rapport au signe de la valeur d'option. La seconde sera plus empirique, nous allons examiner, sur les équations de DIAM, quel effet d'irréversibilité domine.

---

[a] En ce qui concerne la distinction entre la valeur d'option et la valeur de quasi-option toutefois, l'EVFI n'apporte rien de neuf, dans la mesure où elle ne s'affranchit pas de effets (omis dans cette thèse) relevant des préférences subjectives du décideur, comme la courbure de la fonction d'utilité.

[b] Une façon moins économique de voir cela est de remarquer que le dénominateur fait intervenir le terme appelé plus haut x_5 qui s'élimine du numérateur.

3.1. La Valeur de l'Information

Nous allons d'abord montrer graphiquement comment les deux effets d'irréversibilité se combinent, et décrire des situations dans lesquelles on peut dire *a priori* quel effet domine.

⇒ *Notations*

Jusque là, nous n'avons utilisé que la notion de coût total du changement climatique, coût qui pouvait par exemple se mesurer en perte de bien être globale. Dans la suite, nous allons être plus spécifique et supposer que, pour un profil d'émission x donné (x prend donc ici une des valeurs WRE450, WRE550, WGI450, WGI550), le coût total se décompose comme la somme des coûts de réduction des émissions d'une part, et des impacts du changement climatique d'autre part (Equation 7.8). La variable aléatoire $\tilde{a}$ qui représente le niveau des dommages[a] multiplie[b] la fonction d'impact. Le niveau peut être élevé avec un probabilité p, et on aura $a = a^+$, ou être normal avec une probabilité 1 - p, et on aura $a = a^-$.

Equation 7.8 $$TC\,(x) = \text{Reduction Cost}\,(x) + \tilde{a} \times \text{Impact}\,(x)$$

Cette simple hypothèse va permettre d'analyser plus en détail le signe de la valeur d'option, car elle nous permet d'introduire les variables importantes de la discussion: les coûts et les bénéfices d'opportunité conditionnels futurs.

⇒ *Coûts et bénéfices d'opportunité*

Arbitrer entre les plafonds 450 et 550ppmv en 2020, ce sera comparer les coûts d'opportunité d'aller à 450 avec les bénéfices correspondants (dommages évités). Pour être formel, en supposant que nous avons suivi une trajectoire de type α (WRE ou WGI) d'ici à 2020, nous définirons les coûts notés $C(\alpha)$ et les bénéfices notés $\tilde{a} \times B(\alpha)$ du plafond 450 par les équations suivantes[c] :

Equation 7.9 $$\tilde{a} \times B(\alpha) =_{\text{def}} \tilde{a} \times \big(\text{Impact}(\alpha\ 550) - \text{Impact}(\alpha\ 450)\big)$$

Equation 7.10 $$C(\alpha) =_{\text{def}} \text{Reduction Cost}(\alpha 450) - \text{Reduction Cost}(\alpha\ 550)$$

⇒ *Expression de la valeur de l'information*

L'introduction des coûts et des bénéfices est importante car elle permet alors que mieux analyser la valeur de l'information. Celle ci s'écrit :

Equation 7.11 $$\text{EVFI}(\alpha) = \min(C(\alpha), \bar{a}\,B(\alpha)) - p\,\min(C(\alpha), a^+\,B(\alpha)) - (1 - p)\,\min(C(\alpha), a^-B(\alpha))$$

---

[a] En espérance, les dommages seront notés $\bar{a}$, et il vient $\bar{a} = p\,a^+ + (1 - p)\,a^-$

[b] Cette hypothèse simplifie les notations mais n'est pas indispensable sauf à l'Equation 7.12. On pourrait partout écrire B(α, a) au lieu de a × B(α).

[c] D'une façon naturelle, nous désignons un chemin x en accolant un type de trajectoire à court terme α (WRE ou WGI) et un plafond de concentration 450 ou 550. La notation x450 signifie donc: si α = WGI, le chemin x = WGI450, et si α = WRE, le chemin x = WRE450.

Il est alors intéressant de considérer cette expression comme une fonction de C(α). Sa forme est représentée Figure 7.3, qui illustre l'interprétation économique suivante :

Le dommage climatique $\tilde{a}$ est bien aléatoire, mais nous avons supposé connues ses valeurs extrêmes a^- et a^+. Pour un type de trajectoire α à court terme, les bénéfices futurs du plafond 450ppmv sont donc $a^- \times B(\alpha)$ ou $a^+ \times B(\alpha)$. Cette information peut suffir, avant de connaître la réalisation a de $\tilde{a}$, pour comparer les coûts et les bénéfices dans deux cas sur trois :

- Si $C(\alpha)$ est plus petit que $a^- \times B(\alpha)$, alors on peut déjà dire que après α , il sera intéressant de viser 450 ppmv.
- Si $C(\alpha) \geq a^+ \times B(\alpha)$, alors on sait déjà après α , c'est 550 ppmv qui sera intéressant.
- Sinon, c'est que $C(\alpha)$ est dans l'intervalle d'incertitude, et après le premier choix α on attendra d'observer la valeur de $\tilde{a}$ avant de décider le plafond. C'est seulement dans ce cas que la décision est vraiment séquentielle.

Dans les deux premiers cas, l'information précisant le niveau des dommages climatiques ne sert à rien puisque l'on en sait déjà assez pour définir la stratégie à long terme. C'est seulement dans le troisième cas que α s'insère dans une stratégie de décision séquentielle et que l'information a une valeur. Cette valeur est maximale lorsque l'incertitude l'est aussi.

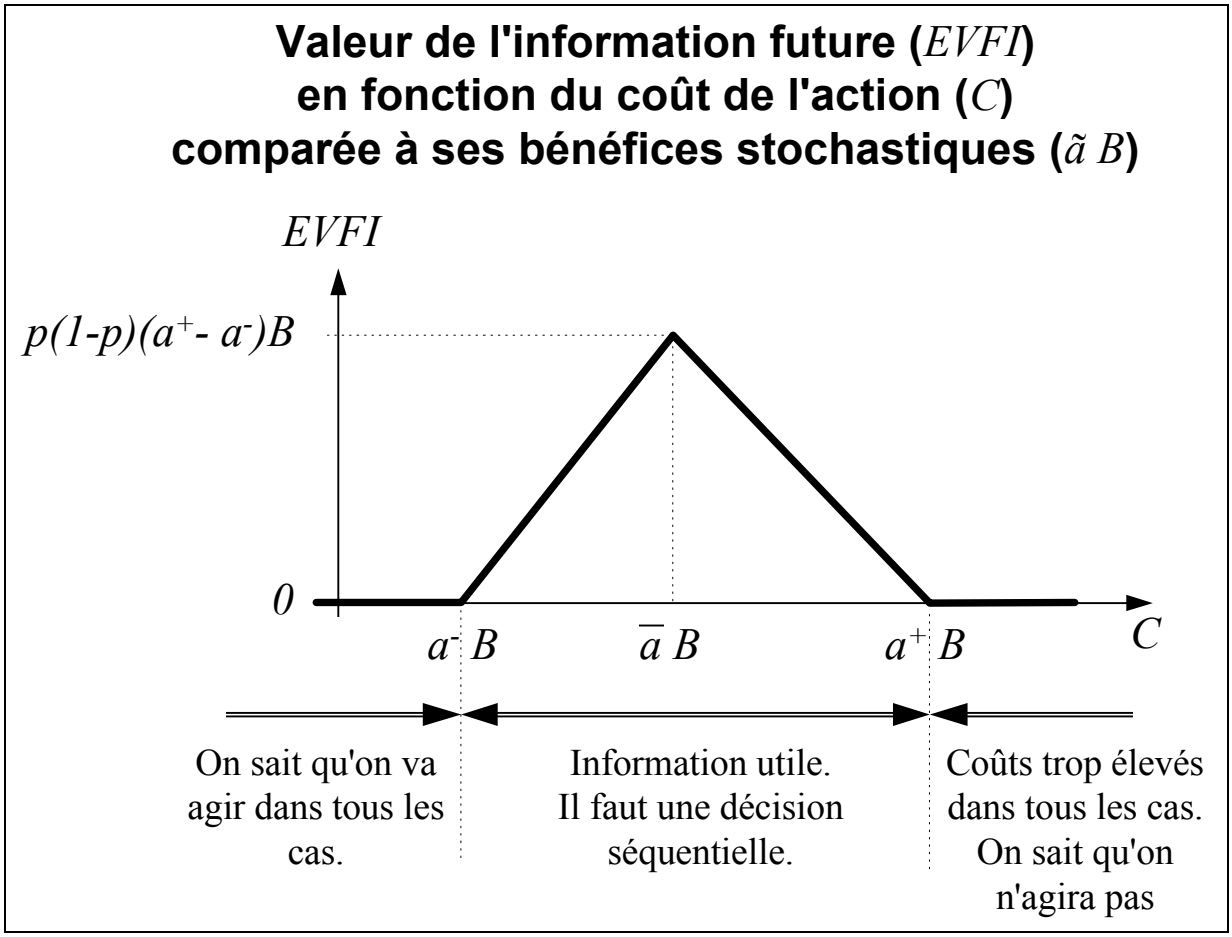


Figure 7.3 : Valeur de l'information.

La valeur maximale de l'information correspond au cas où le coût est égal aux dommages espérés et vaut alors :

Equation 7.12 $EVFI^*(\alpha) = p\,(1 - p)\,(a^+ - a^-)\,B(\alpha)$, *obtenu lorsque* $C(\alpha) = \bar{a}\,B(\alpha)$

3.2. Discussion du signe de la valeur d'option

Ces trois cas se croisent pour chacune des deux alternatives α , ce qui donne les neuf situations possibles décrites Tableau 7.2. Ces neuf situations se retrouvent dans la représentation graphique Figure 7.4, qui représente dans le plan (C(WRE) , C(WGI)) la valeur d'option de la préservation (Equation 7.6). Rappelons ici la définition de la valeur d'option :

Equation 7.6 $$OV(WGI) = EVFI(WGI) - EFVI(WRE)$$

L'allure générale de la Figure 7.4 peut se comprendre comme la somme de deux surfaces générées par la courbe représentée Figure 7.3. La courbe associée à EVFI(WGI) génère les bosses de la figure, celle associée à EVFI(WRE), à angle droit de l'autre, génère les vallées.

Les carrés plats aux quatre coins Figure 7.4 correspondent aux cases de coin du Tableau 7.2 repérées A1, C1, A3 et C3. Il s'agit des quatre situations dans lesquelles l'incertitude ne joue pas du tout et la valeur d'option est nulle. Dans ces situations, le décideur peut faire comme si le dommage climatique $\tilde{a}$ était déterminé, l'incertitude étant assez petite pour pouvoir comparer aujourd'hui les coûts et les bénéfices futurs.

Par exemple, la case C3 est définie par $C(\text{WRE}) \geq a^{+} \times B(\text{WRE})$ et $C(\text{WGI}) \leq a^{+} \times B(\text{WGI})$. La première inégalité signifie que si l'on choisit aujourd'hui une stratégie de réduction modérée, alors en 2020 on choisira certainement le plafond 550 ppmv, quoique l'on apprenne à propose de la magnitude du dommage climatique. La seconde inégalité signifie que si l'on opte aujourd'hui pour une stratégie agressive, alors en 2020 on optera certainement pour le plafond de 450ppmv. Au total, il s'agit donc d'une situation de tout ou rien, dans laquelle la préservation comme le développement de la ressource sont tous deux irréversibles.

La configuration classique de l'effet d'irréversibilité correspond à la case C2, c'est à dire à la bosse avant-droite. C'est la situation qui nous a servi plus haut pour re-démontrer l'effet d'irréversibilité, dans laquelle WRE450 est exclus a priori, et donc l'exploitation de la ressource est irréversible. On retrouve bien le fait que la valeur d'option de la préservation est positive dans ce cas.

Dans la zone centrale de la figure, qui correspond à la case centrale du tableau, le signe de la valeur d'option n'est pas uniforme. Elle correspond à la situation dans laquelle, quoiqu'on fasse aujourd'hui, on n'exclut pas de réviser ce choix demain. Dans cette situation, l'irréversibilité environnementale et l'irréversibilité des investissements sont toutes deux importantes. Cette zone correspond aux situations de 'décision sous controverse', pour reprendre les termes de l'analyse de Godard présentée au début de cette thèse chapitre 3.3.

			A	B	C
			If we follow WRE, then in 2020 the abatement cost *C*(WRE) to stabilise concentrations at 450ppm will be ..... than the avoided climate damage $\tilde{a} \times B$(WRE).		
			certainly lower	higher or lower, we don't know yet	certainly higher
1	***If we follow WGI***, then in 2020 the cost	certainly higher	Always revise choice (crazy)	WGI is doomed, flexibility bonus goes to WRE	No problem, 550 ppmv is certainly better.
2	*C*(WGI) will be ..... than the damage	higher or lower, we don't know yet	WRE is doomed, flexibility bonus goes to WGI	Decision under controversy	Environmental irreversibility effect, bonus to WGI
3	avoided $\tilde{a} \times B$(WGI)	certainly lower	No problem, 450 ppmv is certainly better	Investment irreversibility effect, bonus to WRE	Choose a high or low course, but no revision will be made

Tableau 7.2 : Décision sous controverse et irréversibilités

Cette table représente les neuf issues possibles d'une analyse a priori en coût (certain) - bénéfice(aléatoire) du problème de décision en deux étapes représenté Figure 7.1.

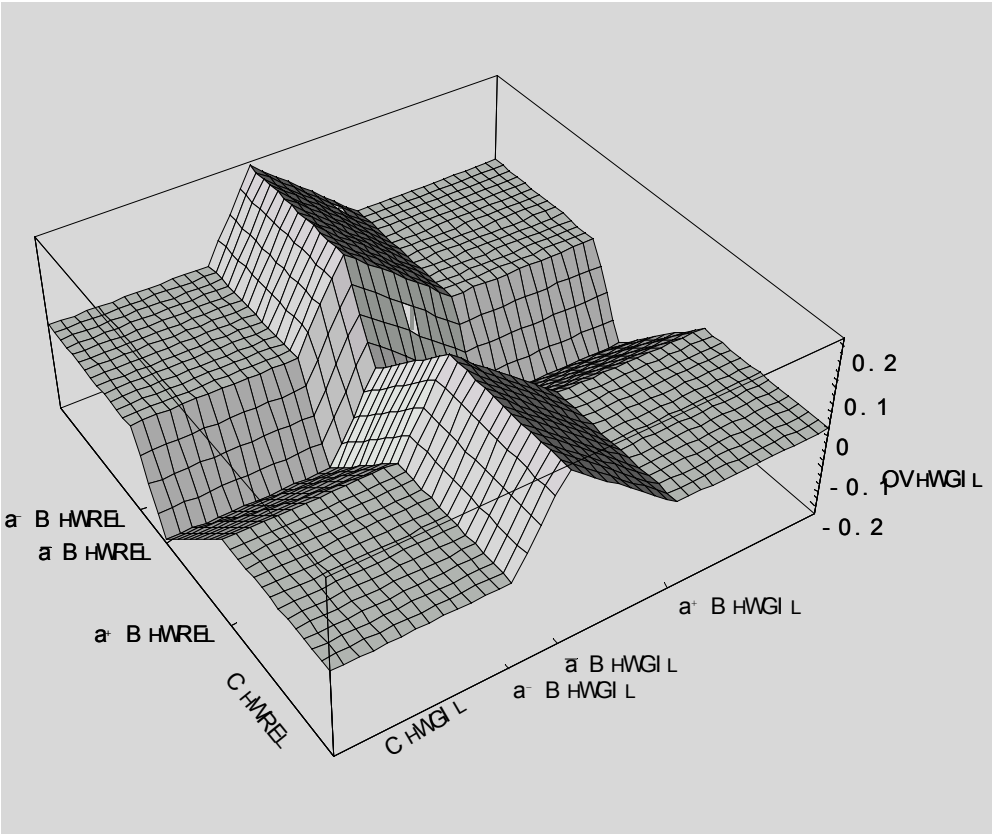


Figure 7.4 : Valeur d'option des réductions agressives à court terme

Figure montrant, dans le plan (C(WRE) , C(WGI)) la valeur d'option de la préservation (différence valeur espérée de l'information future si on choisit WGI moins valeur espérée de l'information future si on choisit WRE) La figure est normalisée en choisissant $a^- = 1$, $a^+ = 2$, B(WGI) = 1 et B(WGI) = 1, pour p = 0.3.

3.3. Analyse quantitative

L'analyse qualitative précédente permet de conclure dans huit cas sur neuf. Mais les incertitudes concernant les effets du changement climatique sont telles que la situation réelle correspond sans doute au neuvième cas, la 'décision sous controverse'. Dans ce cas, on voit que la valeur d'option ne varie pas de façon monotone avec les coûts et les bénéfices.

Dans cette section, nous poursuivons l'analyse empiriquement, à l'aide d'un modèle explicite des coûts de réduction et des dommages climatiques, DIAM. Ce modèle va nous permettre deux choses. Tout d'abord, nous allons explorer l'importance de la valeur d'option par rapport aux autres coûts. Ensuite, nous allons examiner la sensibilité des résultats aux paramètres du modèle, afin de mieux relier les notions théoriques explorées jusqu'ici aux déterminants socio économiques des coûts.

⇒ *Modèle*

Il s'agit donc de spécifier les termes de l'Equation 7.8. Les équations sont rappelées Encadré 7.1. Les chapitres précédents de cette thèse ont présenté et discuté DIAM , dont on trouvera une analyse mathématique et le code en annexe. Les paramètres économiques les plus importants sont le taux d'actualisation ρ (4% par an dans le cas central) et le niveau des dommages climatiques d_{2x} (1.75% du produit intérieur brut mondial de 1990, le GWP, dans le cas central)[a] et le paramètre d'inertie D (50 ans dans le cas central). Rappelons que l'analyse dimensionnelle de l'Equation 7.13 montre que D est une durée, que l'on peut interpréter comme la durée caractéristique du système socio-économique induisant les coûts de réduction. La durée d'évolution caractéristique est évidement un paramètre central lorsque l'on étudie l'irréversibilité d'un système.

Nous appuyant sur l'étude d'experts de Nordhaus, nous étudions l'hypothèse selon laquelle les dommages climatiques pourraient être 7.8 fois plus élevés que dans le scénario de base, avec une probabilité de $p = 10\%$.

⇒ *Résultats*

Le Tableau 7.3 récapitule des différents jeux de paramètres et les différents résultats obtenus. Examinons d'abord le cas central A. On constate que la valeur d'option de préserver la ressource est positive et vaut un quart de point du produit mondial brut. Le coût d'opportunité, qui vaut un demi point si on ne s'attend pas à être informé, est environ divisé par deux dans le cas *avec information*. Mais r est plus petit que 1, ce qui montre que la valeur d'option ne justifierait pas à elle seule de renverser le choix vers WGI par rapport à WRE, puisque OC(WGI) reste positif. Toutefois, il apparaît que r , donc la valeur d'option, est d'un ordre de grandeur significatif. Cela montre que l'incertitude et l'irréversibilité ne peuvent pas être négligées dans l'analyse.

L'importance de la valeur d'option est confirmée dans les autres scénarios B à H. Nous trouvons en effet que pour tous les jeux de paramètres étudiés ici, les coûts d'opportunité *avec* et *sans information* sont significativement différents. Nous observons de plus que :

[a] Ce chiffre correspond à la perte qui serait causée à l'équilibre si le forçage radiatif augmentait autant que si la concentration de CO_2 était doublée par rapport à l'époque préindustrielle, la concentration des autres gaz restant inchangée. La perte est nette des coûts et des bénéfices des mesures d'adaptation.

- Tous les jeux de paramètres étudiés ici, sauf E (actualisation à 3%), représentent des situations de 'décision sous controverse', puisque les EVFI sont non nulles. Ceci ne constitue pas un résultat original en soi, mais plutôt une confirmation du bien fondé du choix des paramètres.
- La prise en compte de l'information ne suffit pas à changer le signe du coût d'opportunité, c'est à dire à renverser la décision à court terme. Certes, les résultats auraient été plus forts si la valeur d'option avait conduit à préférer WGI dans un cadre séquentiel et WRE dans un cas de décisions une fois pour toute. Mais au fond cette remarque ne diminue pas la portée des résultats, puisqu'on comprend aisément que le choix binaire indivisible WRE/WGI n'est qu'un artefact conceptuel pour étudier la politique optimale à court terme.
- Troisièmement, la valeur absolue du coût d'opportunité diminue en décision séquentielle. La valeur d'option minimise la différence de coût total entre les deux alternatives. Ce résultat peut se comprendre intuitivement. Pour un décideur qui sait qu'il pourra s'adapter, les enjeux à court terme sont moins importants que pour le décideur qui choisit une fois pour toutes.

Ces résultats sont représentés graphiquement Figure 7.5, qui est tracée sur une vue de dessus de la zone centrale de la Figure 7.4. Sur cette Figure 7.5, le fond représente la valeur d'option de préserver l'environnement par des nuances de gris. Le blanc correspond aux valeurs les positives de OV(WGI). Les zones sombres correspondent aux vallées, dans lesquelles OV(WGI) est négative, l'effet d'irréversibilité de l'investissement prédomine, et l'exploitation est plus flexible que la préservation.

⇒ ***Sensibilité***

La figure permet d'expliquer les variations de la valeur d'option avec les paramètres d'inertie *D*, d'actualisation ρ et de dommage d_{2x}.

L'Equation 7.13 définit le coût de réduction. Celui ci est déterminé par un taux d'actualisation social sans risque ρ (4%) ; un taux de progrès technique ***r*** (1%) et le temps caractéristique des systèmes énergétiques ***D*** (50 ans). L'échelle des coûts $c_a(D)$ est normalisée ($c_a(50)$=1.36, $c_a(20)$=3.18) afin que le coût total soit comparable aux résultats de DICE's (Nordhaus, 1994).

L'Equation 7.14 définit les dommages climatiques à la date *t* comme une fonction linéaire de la concentration à la date *t* - *L* (*L* = 30 ans), nulle en 1997 (M_0 = 314ppmv), croissante avec la richesse globale au taux de *s* = 1% par an. Le niveau de référence des dommages correspond un doublement de la concentration préindustrielle, soit M_{2x} = 486ppmv, et est fixé à d_{2x} = 1.75% du GWP .

L'Equation 7.15 définit la concentration de CO_2 à la date *t*, en suivant le modèle de perturbation linéaire décrit par exemple dans Enting (1995) ou Hasselmann (1996). Le chemin de référence $\boldsymbol{M^{ref}(t)}$ est calculé à partir du scénario IS92a . La fonction de réponse atmosphérique de perturbation $\boldsymbol{R(u)}$ correspond au modèle W dans Enting, Wigley and Heimann (1994).

Equation 7.13 Reduction Cost = $$\sum_{t=t_0}^{t=2300} (1+\rho)^{t_0 - t}\, c_a(D)\, (1+r)^{t_0 - t} \frac{E^{ref}(t)}{E^{ref}(t_0)} \left[x_t^2 + D^2 (x_t - x_{t-1})^2 \right]$$

Equation 7.14 Climate damage = $$\sum_{t=1997}^{t=2300} e^{-\rho t}\, e^{s t}\, d_{2x} \frac{M_{t-L} - M_0}{M_{2x} - M_0}$$

Equation 7.15 (Carbon cycle) $$M_t = M_t^{ref} - 0.471 \sum_{u=t_0}^{u=t-1} R_{t-u}\, x_u\, E_u^{ref}$$

Encadré 7.1 : Fonctions coût de réduction et dommage climatique - DIAM

Lorsque la durée caractéristique d'évolution du système énergétique D augmente de 20 à 200 ans, le point se déplace vers la droite de B à C en passant par A. Cela signifie que D augmente les coûts d'atteindre 450 ppmv après avoir suivi WRE, sans avoir autant d'effet si on a suivi WGI. Ce résultat se produit parce que D augmente les coûts d'ajustement du système économique, représentés Equation 7.13 par le terme en $D\square(x_t - x_{t-1})^2$. Ces coûts d'ajustement constituent une part importante du surcoût de la trajectoire WRE450 par rapport à WRE550, alors qu'ils ne sont pas si critiques dans la différence entre WGI450 et WGI550.

Diminuer le taux d'actualisation ρ ou bien augmenter les dommages d_{2x} ont des effets de même direction: les points E et F sont tous deux à en bas et à gauche du point A. Cela n'est pas surprenant, étant donné que les dommages climatiques sont situés dans le futur. La direction du déplacement est aussi intuitive. Etant donné que les coûts sont projetés sur un fond dans lequel les dommages climatiques sont fixés, une augmentation de d_{2x} est équivalent sur la figure à une diminution des coûts $C(\alpha)$.

	Paramètres							*Résultats*					
	a^-	a^+	$p(a^+)$	D	d_{2x}	ρ		*EVFI WGI*	*EVFI WRE*	***VO WGI***	*OC WGI* *OneShot*	*OC WGI* *Sequential*	***r***
A	1	7.8	0.1	50	1.75	0.04	A	2.89	2.64	**0.25**	0.51	0.26	**50%**
B	1	7.8	0.1	20	1.75	0.04	B	2.82	3.12	**-0.30**	-0.56	-0.26	**54%**
C	1	7.8	0.1	200	1.75	0.04	C	2.94	2.31	**0.63**	1.24	0.61	**21%**
D	1	7.8	0.1	50	1.75	0.05	D	0.61	0.14	**0.47**	2.12	1.66	**22%**
E	1	7.8	0.1	50	1.75	0.03	E	0.00	9.35	**-9.35**	-13.3	-3.99	**70%**
F	1	7.8	0.1	50	2.50	0.04	F	3.07	4.69	**-1.63**	-2.41	-0.79	**67%**
G	1	7.8	0.1	50	1.04	0.04	G	1.29	0.70	**0.59**	1.84	1.24	**32%**
H	1	3.9	0.1	50	1.75	0.04	H	0.91	0.24	**0.67**	1.27	0.60	**53%**

Tableau 7.3 : DIAM: Valeur d'option de WGI.

Le tableau montre la sensibilité de la valeur espérée de l'information future EVFI, la valeur d'option OV, et le coût d'opportunité OC et de l'importance relative de la valeur d'option r, aux paramètres d'inertie socio-économique D, d'actualisation ρ, de dommages climatiques dans l'ensemble d_{2x} et de dommages climatiques dans le cas élevé a^+. Résultats: (i) Excepté E, les 7 autres scénarios représentent une décision sous controverse (EVFIs non nulles). L'importance relative r est (ii) significative, autour de cinquante pour-cent, et (iii) positive.

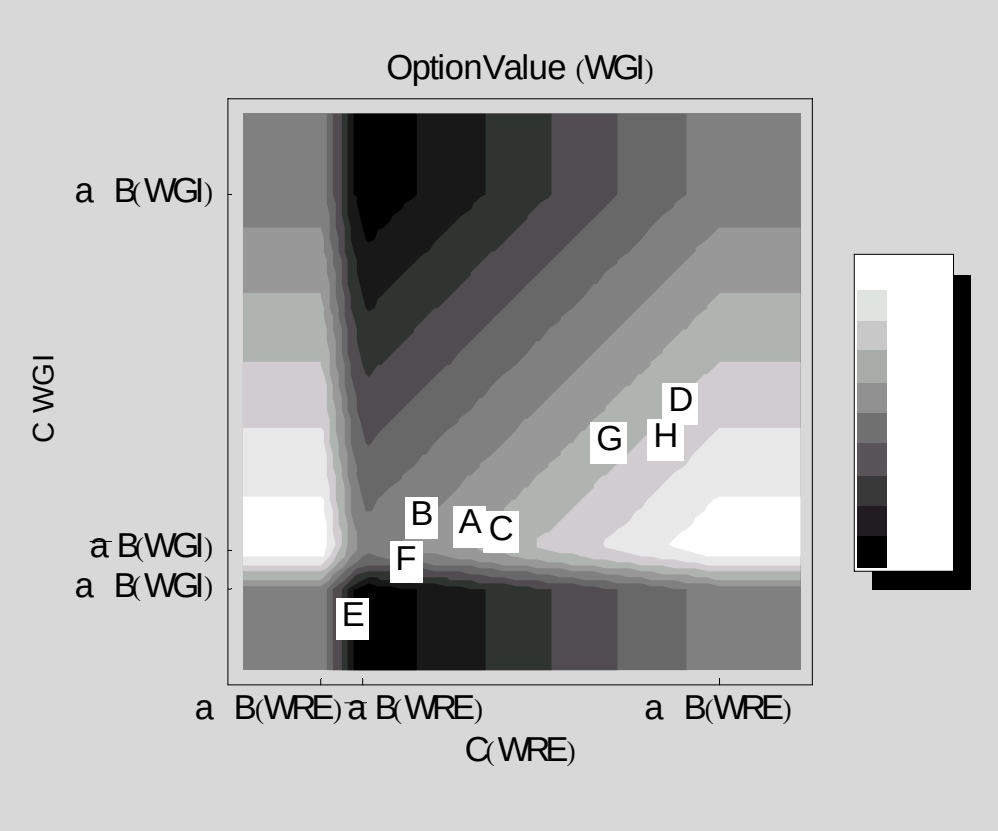


Figure 7.5 : DIAM: Valeur d'option de WGI

Les lettres correspondent aux différents scénarios du Tableau 7.3. Le fond correspond à une vue de dessus de partie centrale de la Figure 7.4 avec p=0.1. La valeur d'option est représentée par des niveau de gris. Pour chaque scénario, nous avons calculé les C(α) et B(α), puis le point de coordonnées (C(WRE), C(WGI)) a été placé avec la transformation linéaire par morceaux qui envoie {0, a^- B(α) , $\bar{a}$ B(α), a^+ B(α)} sur {0, 1, 1.1, 2}.

4. Discussion

4.1. Résumé des résultats et implications

Dans ce chapitre, nous avons examiné comment prendre en compte l'irréversibilité dans l'évaluation du changement global sous l'angle de la théorie de la décision. Partant de la valeur d'option, nous avons mis en évidence la valeur de l'information future comme une mesure la flexibilité des choix. S'engager à court terme dans un choix irréversible implique que la valeur de l'information future est nulle. Plus on s'ouvre d'options, plus l'information pourra être utile.

Nous avons défini un modèle élémentaire d'analyse de la décision se rapportant à la controverse WGI/WRE, qui compare les coûts de réduction et les dommages climatiques liés à quatre scénarios d'émission donnés. En un sens, cette méthode relève de l'optimisation intertemporelle, mais de la façon la plus simple possible: on choisit le moindre coût dans un problème à deux périodes et deux alternatives par période. Cette simplicité permet d'envisager de reproduire les calculs présentés avec d'autres modèles intégrés.

Nous avons exploré empiriquement la valeur d'option de préserver l'environnement pour le problème du changement climatique. Les résultats laissent penser que cette valeur d'option est très significative en valeur absolue, typiquement de l'ordre de 50% du coût d'opportunité sans information. Le signe que nous avons trouvé pour la valeur d'option est variable, mais il correspond à l'intuition selon laquelle en décision séquentielle, l'enjeu à court terme est moins critique qu'en décision une fois pour toutes.

L'importance de la valeur d'option conduit à signifier que la flexibilité devrait être un objectif central des politiques climatiques. Cela implique que les décisions ayant des conséquences à long terme, comme les investissements dans les infrastructures de transport ou la planification urbaine, devraient déjà intégrer des considérations d'économie du carbone, afin de préserver à la fois le système énergétique, l'industrie et les écosystèmes de mauvaises et coûteuses surprises.

Les investissements immatériels, comme le capital humain, scientifique et technique, sont tout aussi importants. Maximiser la flexibilité future implique d'augmenter considérablement le savoir-faire concernant les solutions énergétiques alternatives économiquement viables.

De telles politiques ne devraient toutefois pas privilégier trop tôt l'une ou l'autre de ces solutions alternatives, et au contraire tenter de contourner les effets de 'lock-in' sur des technologies potentiellement moins efficaces à long terme.

4.2. Deux dimensions supplémentaires: information et préférences

Au cours de ce chapitre, nous avons été amenés à laisser de côté deux aspects importants du problème de la décision. En effet, information endogène et préférences interagissant directement avec la valeur d'option, les faire varier aurait considérablement brouillé la vue que nous avons pu avoir sur l'objet de notre étude, à savoir l'irréversibilité.

Puisque nous avons omis des éléments déterminants de la valeur d'option, titrer ce chapitre sur « changement climatique et valeur de quasi-option » aurait peut être été plus précis. Mais cela n'aurait pas nécessairement plus exact dans la mesure où l'irréversibilité absolue n'apparaît pas. De plus, la méthode utilisée consiste bien à calculer une valeur d'option, ce sont seulement les caractéristiques particulières du modèle qui guident l'interprétation.

⇒ *Les préférences*

Nous avons déjà expliqué plus haut pourquoi tout ce qui précède fait abstraction de l'effet systématique de l'aversion envers le risque.

Sur le fond, rappelons toutefois que la décroissance de l'utilité marginale de la richesse pourrait, au moins dans certaines régions du monde, avoir un rôle important dans l'asymétrie entre les bonnes et

les mauvaises nouvelles climatiques.

Sur le plan méthodologique, il serait peut être possible de réutiliser le cadre formel développé dans ce chapitre. Lorsque l'on remplace les gains par des, toutes les grandeurs (OV, OC, EVFI) peuvent rester définies de la même façon, puisque la structure logique du raisonnement n'est pas changée. La variation des résultats mesure l'effet de l'attitude au risque des agents. Comparer les résultats avec et sans fonction d'utilité permettrait donc de séparer la 'prime d'aversion au risque' de la 'prime de flexibilité'.

Nous n'aborderons pas plus la vaste littérature sur la question des préférences, intertemporelles et intergénérationnelles. En relation avec le problème des négociations, cela pourrait nous conduire à dépasser largement l'hypothèse de l'agent unique qui nous sert ici.

⇒ *L'information dépendante*

Le raisonnement qualifiant la valeur espérée de l'information comme mesure de la flexibilité des choix n'est valable que si l'information reçue est la même quel que soit le choix à court terme. Lorsque les informations reçues changent en fonction du choix[30], on peut distinguer :

- La flexibilité décisionnelle pure, correspondant à la réversibilité plus ou moins grande des actions. Elle est en jeu lorsqu'on évalue un investissement irrécupérable, le développement d'une capacité de production, par exemple.
- La flexibilité informationnelle pure, correspondant à l'acquisition plus ou moins grande d'information entraînée par les actions. Elle est en jeu lorsqu'on évalue une étude de marché, par exemple.

En théorie, comme le décrit Charlier, il importe donc de savoir quelle choix entraîne une augmentation de l'information. Si l'on suppose qu'il n'y aura moins d'information si on agit que si on attend, cela diminue la valeur de l'information EVFI(WGI) devant EVFI(WRE). La valeur d'option de WGI diminue.

L'argument de connaissance endogène pourrait privilégier, à première vue, des réductions optimales à court terme moins fortes. Même cela pose de sérieux problèmes de quantification objective du progrès et de la pertinence des connaissances scientifiques, on pourrait en effet penser que freiner l'augmentation des concentrations ralentit du même coup l'émergence du signal constitué par le changement climatique du bruit de fond de la variabilité naturelle du climat. Mais un examen plus approfondi de la question pourrait aller en sens contraire de cette intuition. On pourrait tout d'abord exposer trois raisons pour lesquelles l'effet explicité ci dessus est négligeable :

- À moyen terme, le progrès de la connaissance scientifique n'est pas synonyme de réduction significative des incertitudes, et a cause du caractère non linéaire et chaotique du système, un risque de surprise climatique perdurera à long terme.
- L'augmentation du stock de polluant réduit seulement l'incertitude de nature scientifique, alors que nous avons vu que le décideur devait aussi prendre en compte d'autres sources sociales de risque de crise climatique.
- Enfin et surtout, l'examen des chiffres montre que les limitations d'émissions dont il est question en pratique n'auront que des effets négligeables sur l'évolution des concentrations, et a fortiori du changement climatique, à échéance de quelques décennies.

En opposition à cet effet relativement faible, on pourrait mettre en avant en effet substantiel des réductions d'émission sur la connaissance :

- En pratique, des politiques climatiques plus fortes sont susceptibles de s'accompagner de ou même de conduire à une intensification de la recherche scientifique publique et privée.
- La limitation des émissions est susceptible de provoquer une forte arrivée d'information du côté des coûts de réduction, sur le plan technique et économique, puisque nous avons vu l'existence

d'un progrès technique induit dans le secteur énergétique.

Toutes ces raisons montrent que l'argument de la connaissance endogène pourrait plutôt renforcer le principe de précaution, alors que l'on aurait pu penser le contraire a priori. La dernière nous renvoie sur la problématique du changement technique étudié au Chapitre 5

Références bibliographiques

[1] Nicolas Treich, *Economie de l'Incertain: Analyse de la Précaution*, Thèse de doctorat en Sciences Economiques, Université des Sciences Sociales de Toulouse, 8 décembre 1997.

[2] Edmond Malinvaud, *First Order Certainty Equivalent*, Econometrica, 37, 706-718, 1969.

[3] Claude Henry, *Investment Decisions Under Uncertainty: The "Irreversibility Effect"*, American Economic Review, 64 (6), 1006-1012, déc 1974.

[4] Keneth J. Arrow, Anthony C.Fisher, *Environmental preservation, uncertainty, and irreversibity*, Quarterly Journal of Economics, 88, 312-319, may 1974.

[5] H. Teil, *Econometric models and welfare maximization*, Weltwirschaftigsche Archiv, 72, 60-83, 1954.

[6] Herbert A. Simon, *Dynamic programming under uncertainty with a quadratic criterion function*, in Models of bounded rationnality, 2.6, p. 227-234, publié originellement dans Econometrica, 24, 74-81, 1956.

[7] Theodore Graham-Tomasi, *Quasi-Option Value*, ch. 26 in Handbook of Environnemental Economics, 1995.

[8] Olivier Faverau, *Irréversibilités et Institutions : problèmes micro-macro*, in Robert Boyer, Bernard Chavance et Olivier Godard (eds.), Les figures de l'irréversibilité en économie, Recherches d'histoire et de sciences sociales, Editions de l'Ecole des Hautes études en Sciences Sociales, 1991. Ouvrage issu d'un colloque international organisé par l'EHESS à Paris, en juin 1989.

[9] M. Hanemann, *Information and the Concept of Option Value*, Journal of Environnemental Economics and Management, 16, 23-27.

[10] Anthony C. Fisher et W. M. Hanemann, *Option Value: Theory and Measurement*, European Review of Agricultural Economics, 17, 167-180, 1990.

[11] B. A. Weisbrod, *Collective-Consumption Services of Individual-Consumption Goods*, Quarterly Journal of Economics, 78, 471-477, août 1964.

[12] GIEC, *Climate Change 1995 - Economic and Social Dimensions of Climate Change, Contribution of Working Group III to the Second Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, CUP, paragraphe 5.5.2, 1996.

[13] GIEC, Groupe III, *résumé du ch. 10*, 1996.

[14] Alan S. Manne et Richard Richels, *Buying Greenhouse Insurance: The Economic Cost of CO2 Emissions Limits*, MIT Press, p. , 1992.

[15] William D. Nordhaus, *Managing the Global Commons, The Economics of Climate Change*, MIT Press, Cambridge, MA, p. 186, 1994.

[16] Stephen C. Peck et Thomas J. Teisberg, *Global Warming Uncertainties and the Value of Information: An Analysis using CETA*, Resource and Energy Economics, 15, 71-97, fig. 9 and 10, 1993.

[17] Robert J. Lempert, Michael E. Schlesinger et Steve C. Bankes, *When We Don't Know the Costs of the Benefits: Adaptative Strategies for Abating Climate Change*, Climatic Change, 33, 235-374, 1996. RAND reprint RP-557, 1996.

[18] Nicolas Treich, *op. cit.*, 1997.

[19] A. Beltratti, G. Chichilniski and G. Heal. *Climate Change and Option Values*, paper prepared for the IPCC WGIII, Montreux, 3-6 March 1994.

[20] Oleg Eismont et Heinz Welsch, *Optimal Greenhouse Gas Emissions under various Assessments of Climate Change Ambiguity*, Environmental and Resource Economics, 8, 129-140, 1996.

[21] Asbjørn Torvanger, *Uncertain Climate Change in an Intergenerational Planning Model*, Environmental and Resource Economics, 9, 103-124, janvier 1997.

[22] Avinash K Dixit et Robert S. Pindyck, *The timing of environmental policy*, ch. 12.3, p. 412-418 in *Investment under uncertainty*, Princeton University Press, New Jersey, 1994.

[23] Alistair Ulph et David Ulph, *Global Warming, Irreversibility and Learning*, The Economic Journal, 107 (442), 636-650, may 1997.

Références bibliographiques

[24] Charles D. Kolstad, *Looking vs. Leaping: the timing of CO2 control in the face of uncertainty and learning*, in Y. Kaya, N. Nakicenovic, W. D. Nordhaus and F. L. Toth (eds), Costs, Impacts and Possible Benefits of CO2 mitigation, IIASA CP-93-2, juin 1993. Actes d'un Workshop tenu à Laxenburg, Austria, 28-30 septembre 1992.

[25] Charles D. Kolstad, *George Bush versus Al Gore, Irreversibilities in the greenhouse gas accumulation and emission control invesment*, Energy Policy, 22(9), 771-778, 1994.

[26] Charles D. Kolstad, *Fundamental Irreversibilities in Stock Externalities*, Journal of Public Economics, 60, 221-233, 1996.

[27] Charles D. Kolstad, *Learning and Stock Effects in Environmental Regulation: The Case of Greenhouse Gas Emisions*, Journal of Environmental Economics and Management, 31, 1-18, 1996.

[28] Anthony C. Fisher et W. M. Hanemann, *op. cit., 1990.*

[29] Werner Hediger, *On the Opportunity Cost of Climate Change and Policy*, IPCC.WGIII Swiss Topical Workshop on Decision Making Under Uncertainty and Climate Change Risk Economics, Published by the Paul Scherrer Institut, Environmental Economics, Montreux, Suisse, 3-6 mars 1994.

[30] Christophe Charlier, *Effet Irréversibilité et Information Endogène*, Document de travail du Séminaire d'Analyse Economique, 94/11, LATAPSES, nov 1994.

Chapitre 8. Conclusion

En conclusion, nous allons tout d'abord rappeler le chemin parcouru. Examiner ce travail permet d'aborder de façon plus efficace certaines des questions restant ouvertes à propos des aspects socio-économiques du changement climatique. Dans un second temps, nous élargirons le propos en résumant ses prolongements possibles tant au niveau substantif qu'au niveau théorique et méthodologique

1. Principaux résultats: Effet d'irréversibilité et précaution

1.1. La thèse

Rappelons tout d'abord la thèse défendue dans ce travail (1.4 page 13) :

La prise en compte de l'irréversibilité dans l'évaluation du changement climatique contribue à justifier une action de réduction des émissions de GES sensible à court terme.

L'analyse des conditions du changement climatique et de l'historique des débats nous a permis de préciser ce point de vue assez général : Nous avons considéré les réductions d'émissions de CO_2 dans les pays riches par rapport au scénario IS92a.

La question des réductions sensibles à court terme peut se poser parce que les modèles du cycle du carbone montrent que suivre pendant une ou deux décennies le scénario d'émissions de référence IS92a ne serait pas incompatible avec une stabilisation de la concentration en dioxyde de carbone à 550ppmv ou au dessus.

Dans ces termes, les éléments de réponse qu'apporte cette thèse s'inscrivent dans un contexte de controverse scientifique car, comme le remarquent Wigley, Richels et Edmonds, différer la réduction pendant 20 ans entraînerait des économies sensibles en raison de trois facteurs :

- L'actualisation : Les générations futures seront probablement mieux loties que nous le sommes. Or, nos actions contre le changement climatique ne produiront leurs bénéfices qu'à très long terme. En ce sens, elles sont assimilables à des transferts de richesse d'une populations plus pauvre (générations présentes), vers une plus riche (générations futures).
- Le progrès technique autonome : Le temps ouvre de nouvelles opportunités pour réduire les émissions. Depuis la révolution industrielle, le progrès technique ne semble pas s'être essoufflé. La société future se dessine avec la révolution des technologies de l'information, ce qui diminuera naturellement l'utilisation des ressources matérielles et énergétiques.
- L'inertie du capital en place : Tenir compte du capital en place empêche de considérer des réformes rapides. D'ici la fin du siècle prochain, la plupart de ce capital aura été remplacé au moins deux fois. Il est important de saisir cette opportunité et d'éviter d'accélérer l'obsolescence du capital. Réformer les institutions demande aussi du temps. Par exemple, la réallocation de la force de travail s'accompagne souvent d'un coût social élevé.

Dans cette thèse, nous avons mis en évidence à l'aide d'un modèle intégré, DIAM, plusieurs arguments permettant de contrebalancer ces trois points. Comme nous allons le voir, ces ar-

guments sont basés sur une mesure de l'irréversibilité : les temps caractéristiques des composantes socio-économiques et climatiques du système.

1.2. Dans un cadre déterministe

Au chapitre 5, nous avons mis en évidence l'importance de la question des coûts d'ajustement, associée à l'inertie du capital en place. Cette inertie implique d'étaler les efforts dans le temps. Cela justifie des réformes graduelles, mais aussi de lancer les réformes plus tôt. Si attendre une décennie ou deux est physiquement compatible avec un doublement de la concentration de CO_2 , soit un plafond de 550ppmv, cela devient économiquement incompatible avec un plafond au doublement de la concentration de CO_2*-équivalent*, à 450ppmv environ.

D'une manière générale, on peut décrire ainsi l'effet de l'inertie socio-économique sur les politiques de réduction optimales : Si le chemin de référence coupe le plafond de concentration à la date D*, et si il faut N années pour réformer le système énergétique, alors il est optimal de commencer les efforts le plus tard possible, c'est à dire l'année D* - N.

Concrètement, le scénario IS92a passe à 450ppmv autour de D* = 2040 et à 550ppmv autour de D* = 2080. Le temps caractéristique d'évolution du système énergétique mondial peut s'estimer à N = 50 ans environ. Nous avons montré que les modèles intégrés existant tendaient à sous évaluer ce paramètre, ce qui les conduit à sous estimer les coûts d'ajustement présents et futurs.

Avec ces valeurs raisonnables, il apparaît bien qu'une action commençant dès 1990 est optimale pour atteindre le plafond de 450 ppmv, ce qui limite l'intérêt des trois remarques de WRE à 550ppmv et au dessus.

Nous avons aussi montré que les modèles intégrés actuels représentaient difficilement la dynamique du progrès technique, et en particulier le progrès induit, ce qui pose problème pour la définition et l'estimation des coûts de réduction à long terme. En effet, les systèmes énergétiques sont adaptables et la baisse des coûts des technologies alternatives est fondée en partie sur des rendements croissants d'adoption et d'échelle. Cela entraîne que la contrainte d'émissions induit une dynamique de diminution des coûts de réduction. Dès lors, une réponse précoce accélère la genèse des solutions au problème énergie/climat à des coûts proches des technologies disponibles.

Le raisonnement précédent montre qu'une action précoce pourrait ouvrir la possibilité de limiter la concentration de CO_2 aux alentours de 450 ppmv. Mais avec la reconnaissance du fait que l'essentiel des coûts de réduction pourraient être des coûts d'ajustement, une logique d'équilibres multiples s'introduit dans le raisonnement. En effet, la désirabilité économique de ce plafond de concentration s'effondre si on suppose que les émissions suivront le chemin de référence pendant deux décennies.

Deux visions du mondes apparaissent alors : celle où l'on vise un plafond de concentration rapproché en lançant des mesures dès aujourd'hui, et celle où l'on vise au dessus de 550 ppmv en retardant l'action d'une ou plusieurs décennies. Dans les deux positions, l'action à court terme justifie l'objectif à long terme et réciproquement, ce qui rend plus difficile la comparaison des avantages et des coûts entre ces scénarios.

1.3. En décision séquentielle

Cependant le problème est de trouver une stratégie prudente pour les dix ou vingt ans à venir, il n'est pas de rechercher une trajectoire optimale sur le prochain siècle en comparant des scé-

narios donnés une fois pour toute. Nous avons poursuivi l'analyse au chapitre 6 en modélisant explicitement la possibilité d'une révision des politiques climatiques au cours du temps.

Dans un cadre coût-contrainte il est apparu que les effets sur les réductions optimales à court terme de l'actualisation et de l'inertie sont relativement faibles devant l'incertitude sur le plafond à long terme. Nous avons aussi examiné l'optimalité d'un comportement de précaution dans les modèles intégrés dans le cadre coût-bénéfice. Il est apparu que les résultats à cet égard sont fortement sensibles aux hypothèses relatives à la régularité, ou au contraire à la non-linéarité, de la fonction de dommages climatique.

Cette discussion à conduit à mettre en valeur le rôle d'un nouveau paramètre, la largeur de la plage de concentration entre le niveau où les dommages deviennent significatifs et celui où ils deviennent excessifs. Intuitivement, ce paramètre est important : c'est dans le laps de temps entre l'avertissement et la catastrophe que l'on peut agir. Notons P cette durée de préavis. Bien que la quantification de ce préavis soit difficile avec les modèles actuels, les climatologues assurent que le système a connu des évolutions rapides dans le passé. Il est clair que les stratégies optimales à court terme dépendent finalement de la comparaison entre ce préavis et le temps de réaction du système qui produit les émissions.

Nous pouvons alors re-formuler la description précédente en tenant compte de l'incertitude. Nous avons vu que si on se donne pour objectif d'éviter la bifurcation climatique l'année D, étant donné l'inertie N du système socio-énergétique, alors il faut commencer au plus tard l'année T-N. Il s'agit d'examiner ce qui se passe compte tenu de l'inertie du système socio-énergétique N et du préavis dont on disposerait dans le pire des cas P. Si l'on s'attend à un préavis significativement plus court que le temps de réaction, alors il est optimal de prendre des mesures de précaution dès à présent.

Ce résultat, obtenu avec un modèle intégré du changement climatique, illustre l'analyse conceptuelle de la décision sous controverse au chapitre 3 (section 3) : plus que la dissection des coûts et des bénéfices à très long terme, c'est la gestion du temps qui est critique pour les politiques. Il est d'autant plus intéressant que, alors que la date butoir D^* dépendait d'un plafond optimal à long terme difficile à déterminer tant au plan théorique qu'empirique l'on ne savait pas déterminer, les sciences du climat permettraient une approche effective du paramètre P.

1.4. En analyse de la décision

Au chapitre 7, nous avons replacé nos résultats dans la théorie de la valeur de quasi-option et de l'effet d'irréversibilité. Sous cet angle, il apparaît que deux facteurs s'opposent sur l'opportunité de réduire et limiter à court terme les émissions de gaz à effet de serre. Limiter l'accumulation des gaz à effet de serre (irréversibilité environnementale) serait avantageux en cas de mauvaise surprise. Mais symétriquement, limiter les dépenses irrécupérables associées aux mesures de politique énergétique (irréversibilité des investissements) serait avantageux si la sensibilité du climat au forçage radiatif s'avérait plus faible.

Pour tenter de déterminer quelle irréversibilité domine, nous avons chiffré la valeur d'option de préserver l'environnement. Pour cela, nous avons défini un modèle élémentaire d'analyse de la décision se rapportant à la controverse WGI/WRE, qui compare les coûts de réduction et les dommages climatiques liés à quatre scénarios d'émission donnés. En un sens, cette méthode relève de l'optimisation intertemporelle, mais de la façon la plus simple possible: on minimise le coût dans un problème à deux périodes et deux alternatives par période.

Dans nos résultats, l'ordre de grandeur de la valeur d'option est très significatif, typiquement de l'ordre de 50% du coût d'opportunité sans information. La majorité, mais pas la totalité, des scénarios étudiés privilégie un effet d'irréversibilité environnemental.

Les résultats montrent que la valeur d'option de WGI est positive lorsque lorsque le coût d'opportunité de WGI est positif lui aussi. Elle vient alors diminuer ce coût. Lorsque WGI a un bénéfice d'opportunité, sa valeur d'option est négative, elle vient diminuer ce bénéfice. Ces résultats s'interprétent à l'aide de l'intuition suivante : En décision séquentielle, l'enjeu à court terme est moins critique que si les choix devaient être arrêtés aujourd'hui une fois pour toutes.

2. Quelques ouvertures pour les travaux futurs

Sur les questions du lien entre risques globaux d'environnement et développement durable, nous espérons que cette thèse ouvre quelques perspectives. Nous examinerons d'abord celles dirigées pour les problèmes de décision publique relatives aux les politiques climatiques, puis celles participant à l'avancée de la théorie économique.

2.1. Vers la prise en compte des hétérogénéités

Nous n'avons pas la naiveté de penser que le monde réel est fidèlement représenté par un modèle agrégé où la décision publique est représentée par un agent unique doté de plus ou moins de perspicacité. Nous pensons que tel que DIAM, exposé dans cette thèse, a participé utilement aux débats tels qu'ils se posaient jusqu'ici, à savoir : *faut il agir ou pas, et quand ?*

Mais après Kyoto, il atteind ses limites pour les problèmes qui restent à trancher par les décideurs publics. Pour y répondre, ce type de modèle doit être étendu pour incorporer autant que faire se peut les différents niveaux d'hétérogénéité du monde réel.

⇒ *Régionalisation*

Le premier d'entre eux, le plus sensible, est celui de l'étude des objectifs de réduction des émissions sur le long terme au sein des pays de l'OCDE tout d'abord (pour après 2008) entre pays de l'OCDE et pays en développement ensuite. Les débats ici demandent évidement un éclairage sur les liens équité-efficacité.

L'équité pose des questions touchant aux critères ultimes de répartition des droits d'émettre tels que convergence par tête (critères mixtes impliquant le niveau de revenu, par exemple). En liaison avec les aspects démographiques, elle concerne aussi la rapidité des sentiers de transition vers un tel objectif.

L'efficacité, à un niveau apparament plus abstrait mais finalement éclairant du point de vue des fondamentaux qui guident les postures de négociation, est relative à l'optimum de premier rang pour une vision donnée des critères souhaitables de distribution des richesses.

L'intérêt d'un modèle de type DIAM, une fois régionalisé, est de faire apparaître dans quelle mesure le progrès technique est à même, en temps et en heure, de réduire des tensions qui s'avéreraient trop fortes entre contraintes climatiques et persistance de conflits d'intérêt.

Le deuxième niveau d'hétérogénéité est celui entre les secteurs. Renforcer transports avec incertitude sur le scénario de référence. Intégrer le Progrès technique induit dans le modèle.

⇒ ***Sectorialisation***

Ayant mis en évidence l'importance de l'inertie et de l'irréversibilité comme paramètre clé, il est intéressant d'étudier comment les coûts de changements de trajectoire se répartissent entre dans un modèle à plusieurs secteurs de flexibilités différentes, et au perspectives de progrès technique induit différentes. Hourcade et Lecocq ont montré que les coûts d'un retard de l'action sur le secteur rigide se reportent plus que proportionnellement sur le secteur flexible. L'inertie relativement élevée des infrastructures de transport, et l'incertitude qui pèse sur le scénario de référence, font que ce secteur est particulièrement important pour l'analyse.

Des résultats de ce type intéressent non seulement la discussion sur l'ordonnancement des actions dans le temps mais aussi les débats sur les priorités sectorielles et les principes de différentiation géographique des objectifs.

2.2. Directions théoriques et méthodologiques

L'interrogation à propos des politiques climatiques ne constitue qu'une instance d'une classe plus importante de problèmes de décision sous incertitude en présence de controverses scientifiques. Cela permet ainsi de déboucher sur des questions théoriques et méthodologiques plus générales. Il y a ici un risque spécifique de rupture entre la théorie de la décision qui reste insuffisament équipée et le développement parfois sans contrôle des modèles intégrés mobilisés dans les processus cognitifs et décisionnels actuels.

⇒ ***Théorie de la décision***

D'un côté, en effet, la valeur d'option, définie dans le cadre de la maximisation de l'utilité intertemporelle séparable, se place dans la perspective plus vaste du comportement séquentiel des agents dans l'incertitude. Comme nous l'avons vu, l'irréversibilité ou la valeur de quasi-option ne constitue qu'une des composantes de la valeur d'option. Nous avons suggéré que deux autres, liées à la forme de la fonction d'utilité et à l'information endogène, pourraient être aussi importantes pour justifier le principe de précaution. On ne dispose pas encore de théorie compréhensive qui engloberait les trois composantes de la valeur d'option visées ci dessus.

Dans un premier temps, nous chercherons à unifier composantes d'aversion au risque et d'irréversibilité. Le rapprochement sera fondé sur la relation suivante, qui montre comment le coût d'une réduction x des émissions, les dommages climatiques associés et l'utilité se composent pour déterminer l'effet en bien être social des politiques climatiques :

$$u(BAUconsumption - reduction_costs\ (x, uncertainty) - climate_damages(x, uncertainty)).$$

Rapprocher un modèle intégré tel DIAM des résultats théoriques sur la relation entre forme de la fonction d'utilité et signe de la valeur d'option est d'autant plus intéressant qu'à cette date l'étude de l'aversion au risque dans l'évaluation intégrée du changement climatique semble assez peu développée.

⇒ ***Modèles d'évaluation intégrée***

En ce qui concerne la modélisation intégrée, la sectorialisation, la régionalisation ou les générations imbriquées relèvent d'une évolution vers un cadre multi-agents, conduisant à des modèles numériquement et scientifiquement de plus en plus complexes.

Cette tendance est renforcée par l'apparition, au dessus de la simulation qui concerne le monde physique, et de l'optimisation qui concerne les agents économiques privés, des modè-

les de viabilité qui se veulent plus proches des buts affirmés par les instances politiques ayant défini le développement durable (voir chapitre 4, section 2.1).

Ainsi, les modèles les plus importants autorisent des analyses quantitatives plus précises, mais peuvent poser des problèmes de contrôle scientifique et technique qui desservent la décision en détournant la discussion du fond du problème. Les modèles plus simples permettent de trier quelles sont les incertitudes importantes, tout en fournissant aussi des outils conceptuels unifiant les différents points de vue pour faciliter la négociation.

Aujourd'hui, les modèles d'évaluation intégrée sont utiles et semblent nécessaires pour donner de la rationalité au processus de décision. De nombreuses questions restent encore très inaccessibles. Parmi les phénomènes dont la compréhension et la représentation dans les modèles fait aujourd'hui défaut, l'évaluation des dommages liés au changement climatique, les particularités des économies des pays non membre de l'OCDE et la dynamique le changement technique sont notoirement importants.

2.3. Conclusion générale

Même si tous ces aspects étaient un jour bien compris, il reste qu'au delà des considérations économiques de nombreux autres aspects politiques, sociaux et humains doivent être considérés pour guider les décisions. Par vocation, l'évaluation intégrée du changement climatique fait appel à des modèles qui prennent en compte de plus en plus de facettes du problème. Elle contribue au nouveau contrat social de la science :

> *As the magnitude of human impacts on the ecological systems of the planet becomes apparent, there is increased realization of the intimate connections between these systems and human health, the economy, social justice, and national security. The concept of what constitutes "the environment" is changing rapidly. Urgent and unprecedented environmental and social changes challenge scientists to define a new social contract. This contract represents a commitment on the part of all scientists to devote their energies and talents to the most pressing problems of the day, in proportion to their importance, in exchange for public funding. The new and unmet needs of society include more comprehensive information, understanding, and technologies for society to move toward a more sustainable biosphere—one which is ecologically sound, economically feasible, and socially just. New fundamental research, faster and more effective transmission of new and existing knowledge to policy- and decision-makers, and better communication of this knowledge to the public will all be required to meet this challenge. (Jane Lubchenco, 1998).*

Bibliographie

[1] Académie des Sciences. L'effet de serre et ses conséquences climatiques - évaluations scientifiques. Rapport du Comité de l'Environnement 25, Académie des Sciences, oct 1990. CADAS, 16, rue Mazarine, 75006 Paris, 44 41 44 00, service de presse 44 41 43 51.

[2] Agence Internationale de l'Energie, OCDE. Technical background paper. In *Uncertainty and Energy Policy Choices to Meet UNFCCC Objectives, Third IEA Modelling Seminar* [3].

[3] Agence Internationale de l'Energie, OCDE. *Uncertainty and Energy Policy Choices to Meet UNFCCC Objectives, Third IEA Modelling Seminar*, October 17-18 1997.

[4] Air & Waste Management Association. *Air & Waste Management Association 82nd annual meeting & exhibition*, June 25-30 1989.

[5] Joseph Alcamo, editor. *IMAGE 2.0 : Integrated Modeling of Global Climate Change, with papers by The IMAGE Project.* Kluwer Academic Publisher, 1994. Reprinted from Water, Air, and Soil Pollution 76(1-2), 1994.

[6] Joseph Alcamo and Eric Kreileman. Emission scenarios and global climate protection. *Global Environmental Change*, 6(4) :305–334, 1996. Appendix B : Procedure for Computing Safe Emission Corridors.

[7] Joseph Alcamo, Eric Kreileman, and Rik Leemans. Global models meet global policy. *Global Environmental Change*, 6(4) :255–259, 1996.

[8] Joseph Alcamo, G. J. J. Kreileman, M. Krol, and G. Zuidema. Modelling the global society-biosphere-climate system : Part 1 : Model description and testing. Submitted for Publication in Journ. Water, Air, Soil Pollution, Special Issue – IMAGE 2.0, aug 1993.

[9] American Association for the Advancement of Science. *AAAS Annual Meeting*, February 14-19 1991.

[10] K. Andrasko. Le réchauffement de la planète et les forêts : survol des connaissances actuelles. *Unasylva*, 41(163) :3–11, 1990.

[11] Svante Arrhenius. On the influence of carbonic acid in the air upon the temperature of the ground. *Philosophical Magazine*, 41(237) :1–1, 1896. Downloaded from Carmen Giunta's classical chemistry page. http :// maple.lemoyne.edu/ giunta/papers.html.

[12] Keneth J. Arrow. The economic implications of learning by doing. *Review of Economic Studies*, 29 :155–173, 1962.

[13] Keneth J. Arrow. Effet de serre et actualisation. *Revue de l'Energie*, 471 :631–636, 1995.

[14] Keneth J. Arrow and Anthony C. Fisher. Environmental preservation, uncertainty, and irreversibity. *Quarterly Journal of Economics*, 88 :312–319, 1974.

[15] Christian Azar and Henning Rodhe. Targets for stabilization of atmospheric CO_2. *Science*, 276 :1818–1819, 1997.

[16] Costas Azariadis and Roger Guesnerie. Prophéties créatrices et persistance des théories. *Revue Economique*, 5 :787–806, 1982.

[17] Philip Bagnoli, Warwick J. McKibbin, and Peter J. Wilcoxen. Global economic prospects : Medium term projections and structural change. In *Energy Modelling Forum 14 - Meeting #4 - Integrated assessment of climate change* [90].

[18] Richard Baron, Khalil Helioui, and Jean-Charles Hourcade. Modelling greenhouse gaz emissions : the role of technology. In *IAEE 17th Annual International Conference* [217].

[19] Robert J. Barro and Xavier Sala-i Martin. *Economic Growth*. McGraw Hill, Boston, MA, 1995.

[20] Marcello Basili and Alessandro Vercelli. Environmental option values, uncertainty aversion and learning. Nota di lavoro 91.96, Fondazione Eni Enrico Mattei, dec 1996.

[21] Olivier Beaumais and Kateline Schubert. Les modèles d'équilibre général appliqués à l'environnement : développements récents. *Revue d'Economie Politique*, 106(3) :356–380, 1996.

[22] Jean-Jacques Becker. Les grandes lignes de la position française dans l'organisation de l'effort international de prévention du changement climatique. *Annales des Ponts et Chaussées*, 79 :50–54, 1996.

[23] Andrea Beltratti. Environmental problems and attitudes towards risk and uncertainty. Paper prepared for the IPCC Working Group III, Montreux, 3-6 March 1993, mar 1994.

[24] Andrea Beltratti, Graciella Chichilinski, and Geoffrey Heal. Environmental conservation policies and option values. nov 1993.

[25] Andrea Beltratti, Graciella Chichilinski, and Geoffrey Heal. Preservation, uncertain future preference and irreversibility. Nota di Lavoro 59.93, Fondazione Eni Enrico Mattei, 1993. An earlier version of this paper was circulated under the title "Option and non-use values of environmental assets".

[26] Andrea Beltratti, Graciella Chichilinski, and Geoffrey Heal. Climate change and option values. In *Swiss Topical Workshop on Decision Making Under Uncertainty and Climate Change Risk Economics* [225].

[27] Andrea Beltratti, Graciella Chichilinski, and Geoffrey Heal. Sustainable use of renewable resources. Nota di Lavoro 70.96, Fondazione Eni Enrico Mattei, nov 1996.

[28] Robert Bindschadler and Patricia Vornberger. Changes in the west antarctic ice sheet since 1963 from declassified satellite photography. *Science*, 279(5251) :689–692, 1998.

[29] R. Bishop. Option value : an exposition and extension. *Land Economics*, 58 :1–15, 1982.

[30] A. Bjorkstrom. One dimensional and two dimensional ocean models for predicting the distribution for CO_2 between the ocean and the atmosphere. In *The changing carbon cycle* [393], pages 258–278.

[31] François (coordinateur) Blasco, editor. *Tendances Nouvelles en Modélisation pour l'Environnement*. Centre National de la Recherche Scientifique, publié chez Elsevier, janvier 1996.

[32] Bert Bolin. Requirements for a satisfactory model of the global carbon cycle and current status of modeling efforts. In *The changing carbon cycle* [393], pages 403–424.

[33] Bert Bolin. Vue d'ensemble de la seconde évaluation de l'ipcc. Support d'un présentation donnée au DEA d'Economie de l'Environnement., feb 1996.

[34] Bert Bolin. Key features of the global climate system to be considered in analysis of the climate change issue. In *Eighth Annual Conference of the European Association of Environmental and Resource Economists* [98].

[35] Bert Bolin. The kyoto negociations on climate change : A science perspective. *Science*, 279(5349) :330–331, 1998.

[36] Jérôme Bourdieu, Benoît Coeuré, and Béatrice Sédillot. Investissement, incertitude et irréversibilité : quelques développements récents de la théorie de l'investissement. *Problèmes Economiques*, 2.534 :23–31, 1997. Reproduction des premières et deuxièmes partie d'un article paru dans la Revue Economique de Janvier 1997.

[37] A. Lans Bovenberg and Ruud A. de Mooij. Environmental tax reform and endogenous growth. *Journal of Public Economics*, 63 :207–237, 1997.

[38] M. Boyer and R. Kihlstrm, editors. *Bayesian Models in Economic Theory*. North-Holland, Amsterdam, 1984. Elsevier, Dordrecht (?).

[39] Robert Boyer, Bernard Chavance, and Olivier Godard. *Les figures de l'irréversibilité en économie*. Number 47 in Recherches d'histoire et de sciences sociales. Editions de l'Ecole des Hautes études en Sciences Sociales, Paris, 1991. Ouvrage issu d'un colloque international organisé par l'EHESS à Paris, en juin 1989.

[40] Wallace Broecker. L'origine des glaciations. *Pour la Science*, Hors série :28–34, 1996. Dossier sur l'Atmosphère.

[41] Wallace Broecker. Thermohaline circulation, the achilles heel of our climate system : Will man-made CO_2 upset the current balance. *Science*, 278(5343) :1582–1588, 1997.

[42] Daniel W. Broomley, editor. *The Handbook of Environmental Economics.* Blackwell Publishers, Cambridge, MA, 1995. Contents : Choices without prices without apologies (Vatn and Bromley), Benefits, costs and the safe minimum standard of conservation (Randall and Farmer), The environment and property rights issues (Schmid), Zoning and the urban environment (Fischel), Public policies for land conservation (Hodge), Intergenerational choices under global environmental change (Howarth and Norgaard), Neoclassical economic growth theory and sustainability (Toman et al), Measuring sustainable development (Pearce and Atkinson), Nonrenewable resource supply : theory and practice (Toman and Walls), Empirical consequences of the Hotelling Principle (Berck), Recycling programs (McClain), Nonconvexities and the theory of external costs (Burrows), Liability and penalty structures in policy design (Segerson), A bargaining framework for the global commons (Bromley and Cochrane), Transferable discharge permits and global warming (Tietenberg), Trade, pollution, and environmental protection (Runge), Optimal timber management policies (Montgomery and Adams), Bioeconomic models of the fishery (Conrad), Management regimes in ocean fisheries (Rettig), Privatization open access fisheries : individual transferable quotas (Anderson), Regulation, imperfect markets and transaction costs : the elusive quest for efficiency in water allocation (Colby), Issues in the conjunctive use of surface water and groundwater (Provencher), Minerals policy (Gordon), Valuation of environmental quality under certainty (Bishop and Woodward), Environmental valuation under uncertainty (Ready), Quasi-option value (Graham-Tomasi), Evaluating changes in risk and risk perceptions by revealed preference (Freeman), Contingent valuation (Bishop et al), Travel cost models (Bockstael), Hedonic pricing methods (Freeman). Abstract : Provides a comprehensive set of materials on environmental and natural resource economics based on 30 specially commissioned pieces by leading authorities in the field.

[43] Jean-Marc Burniaux, John P. Martin, Giuseppe Nicoletti, and Joaquim Oliveira Martins. GREEN – a multi-region dynamic general equilibrium model for quantifying the costs of curbing CO_2 emissions : A technical manual. Working Papers 104, Organisation de Coopération et du Développement Economique, jun 1991. Department of economics and statistics, Resource Allocation Division.

[44] Mark A. Cane, Amy C. Clement, Alexey Kaplan, Yochanan Kushnir, Dmitri Pozdnyakov, Richard Seager, Stephen E. Zebiak, and Ragu Murtugudde. Twentieth-century sea surface temperature trends. *Science*, 275(5302) :957–960, 1997.

[45] Carlo Carraro. Induced technical change in environmental models : Theoretical results and implementations. In *Induced Technical Change and the Environment* [221]. Preliminary, do not quote without permission.

[46] Centre International de Recherches sur l'Environnement et le Développement. *Modélisation prospective, critères de décision et négociation internationale d'un développement durable : le cas des risques climatiques. Séminaire du PRISTE-CNRS*, 28-30 octobre 1992.

[47] Centre National de la Recherche Scientifique. *Les Temps de l'Environnement, Journées du Programme Environnement, Vie et Sociétés*, 5-7 nov 1997.

[48] François Chapel. Le pétrole en 2050. *Centraliens*, 489 :24–26, 1997.

[49] Thierry Chapuis and Ha Duong Minh. Diam : Un modèle dynamique pour etudier linertie et ladaptabilité dans le problème de leffet de serre. In Blasco [31].

[50] Thierry Chapuis, Ha Duong Minh, and Michael J. Grubb. The GreenHouse Cost model : an exploration of the implications for climate policy of inertia and adaptability in energy system. In *International Energy Workshop - June 95* [219].

[51] Thierry Chapuis, Ha Duong Minh, and Michael J. Grubb. The issue of inertia and adaptability in integrated assessment : an analysis using DIAM. In Chen et al. [56].

[52] Thierry Chapuis, Jean-Charles Hourcade, D. Hauglustaine, and Gérard Mégie. Modélisation de l'impact economique des régulations d'emissions de gaz à effet de serre. Note dans le cadre du Programme ECLAT du Ministère de l'Environnement, circa 1995.

[53] Christophe Charlier. Effer irréversibilité et information endogène. Document de travail du Séminaire d'Analyse Economi 94/11, LATAPSES, nov 1994.

[54] Christophe Charlier. Effet d'irréversibilité et information endogène. application à la dissémination d'organisme génétiquement modifiés. *Revue Economique*, 48(1) :1–1, 1997.

[55] Pierre Chemillier. Contribution à la réflexion sur la mise en place d'un marché international de permis d'émissions de gaz à effet de serre. Note à la MIES, may 6 1997.

[56] R. Chen, D. Tuttle, and C. Linville, editors. *Integrated assessment of Global Environmental Change : Science and Policy.* NATO Advanced Research Workshop, 15-19 October 1995.

[57] M. Chevé, L. Ragot, and Kateline Schubert. La croissance optimale durabl dans une economie avec activités polluantes. ERASME-MAD, Ecole Centrale de Paris, décembre 1997.

[58] Graciella Chichilinski. What is sustainable development ? Papier présenté au séminaire étudiants du CIRED, jul 1993.

[59] Graciella Chichilinski and Geoffrey Heal. Global environmental risks. *Journal of Economic Perspectives*, 7(4) :65–86, 1993.

[60] Graciella Chichilinski and Geoffrey Heal. Who should abate carbon emissions ? an international viewpoint. *Economic Letters*, pages 1–8, 1994.

[61] Graciella Chichilinski, Geoffrey Heal, and David Starrett. International emission permits : Equity and efficiency. nov 1993.

[62] R. S. Chirinko. Investment under uncertainty : A review essay. *Journal of Economic Dynamics and Control*, 20(9-10) :1–1, 1996.

[63] Charles J. Cicchetti and Louis L. Wilde. Uniqueness, irreversibility, and the theory of nonuse values. *American Journal of Agricultural Economics*, pages 1121–1125, 1992.

[64] Jean-Pierre Clapin. Effet de serre et prospective industrielle française. Avis et rapports du Conseil économique & social 15 JORF NOR : CESX9700115 V, Conseil Economique et Social, Lundi 20 octobre 1997.

[65] Colin W. Clark. *Mathematical Bioeconomics.* Wiley, New York, 2nd edition, 1991.

[66] Climatic Research Unit, UEA. *PAGE user manual. Development of a Framework of the Evaluation of Policy Options to deal with The Greenhouse Effect.*, apr 1992.

[67] William R. Cline. *The Economics of global Warming.* Institute for International Economics, Washington, DC, June 1992.

[68] William R. Cline. La lutte contre l'effet de serre. *Finance & Développement*, pages 3–9, 1993.

[69] Bruce C. Cohen. The 1860-1988 CO_2 emission and concentration data : econometric implications for sustainable fossil fuel use. *International Journal of Global Energy Issues*, 4(1/2) :65–73, 1992.

[70] Raymond Cointe. Changement de climat : des modèles aux négociations. *Annales des Ponts et Chaussées*, 79 :13–19, 1996.

[71] Commission Mondiale sur l'Environnement et le Développement. *Notre Avenir à Tous.* Les ditions du Fleuve, Montréal, Québec, Canada, décembre 1989. Publié originellement en langue anglaise par Oxford University Press sous le titre Our Common Future, 1987.

[72] Cutter Information Corp. A brief analysis of the kyoto protocol. *Global Environmental Change Report*, IX(24) :1–8, 1996.

[73] Maureen L. Crooper and Wallace E. Oates. Environmental economics : A survey. *Journal of Economic Litterature*, XXX :675–740, 1992.

[74] Joyce Dargay and Dermot Gately. Oil demand in the industrialized countries. *The Energy Journal*, 15(Special Issue) :39–67, 1994.

[75] Joyce Dargay and Dermot Gately. The imperfect price reversibility non-transport oil demand in the OECD. *Energy Economics*, 17(1) :59–71, 1995.

[76] Joel Darmstadter and Michael A. Toman, editors. *Assessing Surprises and Nonlinearities in Greenhouse Warming.* Ressources For the Future, may 1993.

[77] R. F. Darwin. Natural resources and the marshallian effects of input reducing technological changes. *Journal of Environmental Economics and Management*, 23 :201–215, 1992.

[78] Jean-Paul Decaestecker and Gilles Rotillon. Acquisition d'information, innovations et irréversibilités. *Revue Economique*, 41(2) :411–432, 1990.

[79] Avinash K. Dixit and Robert S. Pindyck. *Investment under uncertainty.* Princeton University Press, Princeton, New Jersey, 1994.

[80] Avinash K. Dixit and Robert S. Pindyck. *The timing of environmental policy*, chapter 12.3, pages 412–418. In [79], 1994.

[81] Hadi Dowlatabadi. Adaptative strategies for climate change mitigation : implications for policy design and timing. Draft for comments, jun 16 1996.

[82] Jean-Claude Duplessy. *Quand l'Océan se Fche, Histoire Naturelle du Climat.* Sciences. Editions Odile Jacob, Paris, septembre 1996.

[83] Jean-Claude Duplessy. Les inattendus en climatologie. *Pour la Science*, 237 :10–14, 1997.

[84] Jean-Claude Duplessy and Pierre Morel. *Gros temps sur la planète.* Odile Jacob, Paris, 1990.

[85] David E. Easterling, Briony Horton, Philip D. Jones, Thomas C. Peterson, Thomas R. Karl, David E. Parker, M. James Salinger, Vyacheslav Razurayev, Neil Plummer, Pau Jamason, and Christopher K. Folland. Maximum and minimun temperature trends for the globe. *Science*, 277(5324) :364–367, 1997.

[86] Richard S. Eckaus. Comparing the effects of greenhouse gas emissions on global warming. *The Energy Journal*, 13(1) :25–35, 1994.

[87] Jae A. Edmonds, James Dooley, and Marshall Wise. The role of energy technology in atmospheric stabilization. In Flannery et al. [110]. ISBN 0907252 06 0.

[88] Jae A. Edmonds, M. H. Pitcher, Dave Barns, and M. A. Wise R. Baron. Modeling future greenhouse gas emissions : The second generation model description. In *United Nations University Conference on "Global Change and Modelling"* [399].

[89] Oleg Eismont and Heinz Welsch. Optimal greenhouse gas emissions under various assessments of climate change ambiguity. *Environmental and Resource Economics*, 8 :129–140, 1996.

[90] Energy Modelling Forum 14, Stanford. *Energy Modelling Forum 14 - Meeting #4 - Integrated assessment of climate change*, March 21-23 1996.

[91] Energy Technology Systems Analysis Program, IEA, OECD. Germany's impact on eu burden sharing. *ETSAP News*, pages 6–8, 1997.

[92] Energy Technology Systems Analysis Program, IEA, OECD. Multiregional markal-macro model of emission trading. *ETSAP News*, pages 4–6, 1997.

[93] Energy Technology Systems Analysis Program, IEA, OECD. Probing an uncertain greenhouse future (ii) : Stochastic programming. *ETSAP News*, pages 1–5, 1997.

[94] Energy Technology Systems Analysis Program, IEA, OECD. Probing an uncertain greenhouse future (iii) : the minimax regret strategy. *ETSAP News*, pages 1–3, 1997.

[95] I. G. Enting. The use of observations in calibrating and validating carbon cycle models. In *The changing carbon cycle* [393], pages 425–458.

[96] I. G. Enting. Analysing the conflicting requirements of the framework convention on climate change. *Climatic Change*, 31 :5–18, 1995.

[97] L. G. Epstein. Decision making and temporal resolution of uncertainty. *International Economic Review*, 21 :269–283, 1980.

[98] European Association of Environmental and Resource Economists. *Eighth Annual Conference of the European Association of Environmental and Resource Economists*, June 26-28 1997.

[99] European Commission. *EEC 6th European Conference on Biomass for Energy Industry and Environment*, 1991.

[100] European Commission. *7th European conference on Biomass for Energy and Environment, Agriculture and Industry*, 5-9 octobre 1992.

[101] European Commission. *Workshop on Integrated Environmental Assessmen*, May 18-20 1995.

[102] European Commission. Climate change - the eu approach for kyoto. Communication from the commission, European Commission, 1 oct 1997.

[103] Sylvie Faucheux and Géraldine Froger. Decision-making under environmental uncertainty : towards a procedural rationality. In *Swiss Topical Workshop on Decision Making Under Uncertainty and Climate Change Risk Economics* [225].

[104] M. Faustmann. Martin faustmann and the evolution of discounted cash flow. Technical Report 42, University of Oxford, 1968. Institute paper of the Commonwealth Forestry Institute.

[105] Olivier Favereau. Irréversibilités et institutions : problèmes micro-macro. In *Les figures de l'irréversibilité en économie* [39], pages 69–96. Ouvrage issu d'un colloque international organisé par l'EHESS à Paris, en juin 1989.

[106] Anthony C. Fisher and W. M. Hanemann. Quasi option value : Some misconceptions dispelled. *Journal of Environmental Economics and Management*, 14 :183–190, 1987.

[107] Anthony C. Fisher and W. M. Hanemann. Option value : Theory and measurement. *European Review of Agricultural Economics*, 17 :167–180, 1990.

[108] Anthony C. Fisher and W. M. Hanemann. Assessing climate change risks : Valuation of effects. In Darmstadter and Toman [76].

[109] Anthony C. Fisher, John V. Krutilla, and Charles J. Cicchetti. The economics of environmental preservation : A theorical and empirical analysis. *American Economic Review*, 62 :605–619, 1972.

[110] Brian P. Flannery, Klaus R. Koblhase, and Duane G. LeVine, editors. *IPIECA Symposium on Critical Issues in the Economics of Climate Change*. IPIECA, IPIECA, October 1996. ISBN 0907252 06 0.

[111] J. Fontan. Climats sous surveillance - limites et conditions de l'expertise scientifique. *Natures - Sciences - Sociétés*, 1(4) :369–370, 1993. Compte rendu sur le livre de Philippe Roqueplo.

[112] Xavier Freixas. L'effet d'irréversibilité dans le choix de grands projets. *Revue Economique*, 1 :149–155, 1987.

[113] Xavier Freixas and Jean-Jacques Laffont. The irreversibility effect. In Boyer and Kihlstrm [38], chapter 7. Elsevier, Dordrecht (?).

[114] William Fulkerson, B. D. Reister, Alfred M. Perry, Alan T. Crane, Don E. Kash, and Stanley I. Auerbach. Global warming : An energy technology R&D challenge. *Science*, 246 :868–869, 1989.

[115] Xavier Galiègue. Irréversibilité de l'investissement et valeur d'option. *Revue d'Economie Politique*, 106(5) :843–863, 1996.

[116] Dermot Gately. Imperfect price-reversibility of U.S. gasoline demand : Asymetric responses to price increases and declines. *The Energy Journal*, 13(4) :179–207, 1992.

[117] Dermot Gately. The imperfect price-reversibility of world oil demand. *The Energy Journal*, 14(4) :163–182, 1993.

[118] Nicholas Georgescu-Roegen. *The Entropy Law and the Economic Process*. Harvard University Press, Cambridge, Massachusetts, 1971.

[119] Umwelt Management Beratung Hacker GMBH, editor. *Goals and Instruments for the Achievement of Global Warming Mitigation in Europe*. Technical University, Berlin, EC Environment and Climate Research Programme, July 20-26 1997.

[120] Olivier Godard. L'économie de l'environnement, des univers stabilisés aux univers controversés. *La Lettre de la Régulation*, 9 :1–3, 1993.

[121] Olivier Godard. Science et intérêts : La figure de la dénonciation. a propos d'un livre d'yves lenoir sur l'effet de serre. *Natures - Sciences - Sociétés*, 1(3) :238–245, 1993.

[122] Olivier Godard. Stratégies industrielles et conventions d'environnement : de l'univers stabilisé aux univers controversés. In INSEE [200], chapter Les questions sectorielles, pages 145–174.

[123] Olivier Godard. *Le Principe de Précaution, dans la Conduite des Affaires Humaines*. Institut National de la Recherche Agronomique et Editions de la Maison des Sciences de l'Homme, Paris, 1997. ISBN MSH 2 7351 0740 X. Cet ouvrage trouve son origine dans les Journées annuelles de l'Association "Natures Sciences Sociétés-Dialogues" qui se sont déroulées en décembre 1994.

[124] Olivier Godard. Les enjeux de kyoto. *Le Monde*, pages 20–20, 1997.

[125] Olivier Godard. Note sur les aspects "permis négociables" de la proposition us présentée le 17/1/97. Technical report, Centre International de Recherches sur l'Environnement et le Développement, mar 14 1997.

[126] Olivier Godard. Note sur les aspects "permis négociables" de la proposition us présentée le 17/1/1997. Note adressée à la Mission Interministérielle sur l'Effet de Serre pour la préparation de la conférence de Kyoto., mar 14 1997.

[127] Christian Gollier, Bruno Jullien, and Nicolas Treich. Learning and irreversibility : an economic interpretation of the "precautionary principle". Cahier 97.27.470, Groupe de Recherche en Economie Mathématique et Quantitative, 5 novembre 1997.

[128] A. Golodnikov, A. Gritsevskii, and Sabine Messner. A stochastic version of the dynamic linear programming model MESSAGE III. In *Energy Modelling Forum 14 - Meeting #4 - Integrated assessment of climate change* [90].

[129] Lawrence H. Goulder. Environmental taxation and the double dividend : a reader's guide. In *50th congress of the International Institute of Public Finance* [158].

[130] Lawrence H. Goulder and Stephen H. Schneider. Induced technological change, crowding out, and the attractiveness of CO_2 emissions abatement. Draft for comments presented at CIRED., oct 1996.

[131] Theodore Graham-Tomasi. Quasi-option value. In Broomley [42], chapter 26, pages 594–614. Contents : Choices without prices without apologies (Vatn and Bromley), Benefits, costs and the safe minimum standard of conservation (Randall and Farmer), The environment and property rights issues (Schmid), Zoning and the urban environment (Fischel), Public policies for land conservation (Hodge), Intergenerational choices under global environmental change (Howarth and Norgaard), Neoclassical economic growth theory and sustainability (Toman et al), Measuring sustainable development (Pearce and Atkinson), Nonrenewable resource supply : theory and practice (Toman and Walls), Empirical consequences of the Hotelling Principle (Berck), Recycling programs (McClain), Nonconvexities and the theory of external costs (Burrows), Liability and penalty structures in policy design (Segerson), A bargaining framework for the global commons (Bromley and Cochrane), Transferable discharge permits and global warming (Tietenberg), Trade, pollution, and environmental protection (Runge), Optimal timber management policies (Montgomery and Adams), Bioeconomic models of the fishery (Conrad), Management regimes in ocean fisheries (Rettig), Privatization open access fisheries : individual transferable quotas (Anderson), Regulation, imperfect markets and transaction costs : the elusive quest for efficiency in water allocation (Colby), Issues in the conjunctive use of surface water and groundwater (Provencher), Minerals policy (Gordon), Valuation of environmental quality under certainty (Bishop and Woodward), Environmental valuation under uncertainty (Ready), Quasi-option value (Graham-Tomasi), Evaluating changes in risk and risk perceptions by revealed preference (Freeman), Contingent valuation (Bishop et al), Travel cost models (Bockstael), Hedonic pricing methods (Freeman). Abstract : Provides a comprehensive set of materials on environmental and natural resource economics based on 30 specially commissioned pieces by leading authorities in the field.

[132] John W. Gray. *Mastering Mathematica*. Academic Press, Inc., London, 1994.

[133] Stephen M. Griffies and Kirk Bryan. Predictability of north atlantic multidecadal climatevariability. *Science*, 275(5297) :181–184, 1997.

[134] Jacques Grinvald. De carnot à gaa : Histoire de l'effet de serre. *La Recherche*, 243 :532–538, 1992. Numéro Spécial sur l'Effet de Serre.

[135] Groupement De Recherche OIKIA. *Séminaire du GDR OIKIA au Laboratoire d'Economie des Transports, LYON*, oct 26 1994.

[136] Michael J. Grubb. Energy efficiency and economic fallacies : a reply. *Energy policy*, 20(4) :390–393, 1992.

[137] Michael J. Grubb. Politiques de l'energie et effet de serre. *La Recherche*, 243 :616–625, 1992. Numéro spécial sur l'Effet de Serre.

[138] Michael J. Grubb. Technologies, energy systems, and the timing of CO_2 emissions abatement : an overview of economic issues. In *Incorporating technology issues into the consideration of policy responses to human induced climate change* [400].

[139] Michael J. Grubb. Technologies, energy systems and the timing of CO_2 emissions abatement. *Energy Policy*, 25(2) :159–172, 1997.

[140] Michael J. Grubb, Thierry Chapuis, and Ha Duong Minh. Optimizing climate change abatement responses : On inertia and induced technology development. In *Integrative Assessement of Mitigation, Impacts, and Adaptation to Climate Change* [218].

[141] Michael J. Grubb, Thierry Chapuis, and Ha Duong Minh. The economics of changing course : implications of adaptability and inertia for optimal climate policy. *Energy Policy*, 23(4/5) :417–432, 1995.

[142] Michael J. Grubb, Jae A. Edmonds, Patrick ten Brink, and Morrison Michael. The costs of limiting fossil-fuel emissions : A survey and analysis. *Annu. Rev. Energy Environ.*, 18 :397–478, 1993.

[143] Arnulf Grubler. The transportation sector : Growing demand and emissions. *Pacific and Asian Journal of Energy*, 3(2) :179–199, 1993. Reprint published by IIASA as RR-94-5, may 1994.

[144] Arnulf Grubler, Michael Jefferson, and Nebojša Nakićenović. Global energy perspectives : a summary of the joint study by IIASA and World Energy Council. *Technological Forecasting and Social Change*, 51(3) :237–264, 1996.

[145] Arnulf Grubler and Nebojša Nakićenović. International burden sharing in greenhouse gas reduction. Technical Report RR-94-9, International Institute of Applied System Analysis, jun 1994.

[146] Arnulf Grubler and Fujii Yasumasa. Inter-generational and spatial equity issues of carbon accounts. *Energy*, 16(11/12) :1397–1416, 1991.

[147] Roger Guesnerie. An exploration of the eductive justifications of the rational-expectations hypothesis. *American Economic Review*, 82(5) :1254–1278, 1992.

[148] Robert Kevin Gurney. Climate change and the prospects for action : Does waiting have a price? Papier soumis pour commentaires., sep 1996.

[149] Ha Duong Minh. Conférence de kyoto. Revue de presse, Centre International de Recherches sur l'Environnement et le Développement, dec 1997.

[150] Ha Duong Minh, Michael J. Grubb, and Jean-Charles Hourcade. Influence of socioeconomic inertia and uncertainty on optimal CO_2-emission abatement. *Nature*, 390 :270–274, 1997. Also available electronically as .pdf from Nature website.

[151] Ha Duong Minh and Pierre Matarasso. An experience with mathematica in the field of economics of the environment : DIAM. In Kernen et al. [234].

[152] James K. Hammit and J. L. Adams. The value of international cooperation for abating global climate change. *Resource and Energy Economics*, 18(3) :0–0, 1996.

[153] James K. Hammit, Atul K. Jain, and Donald J. Wuebbles. A welfare-based index for assessing environmental effects of greenhouse-gas emissions. *Nature*, 381 :301–303, 1996.

[154] James K. Hammit, Lempert, and Michael E. Schlesinger. A sequential decision strategy for abating climate change. *Nature*, 357 :315–318, 1992.

[155] H. Hanninen. Assessing ecological implications of climatic change : can we rely on our simulation models? Editorial essay. *Climatic Change*, 31 :1–4, 1995.

[156] G. Hardin. The tragedy of the commons. *Science*, 162 :1243–1258, 1968.

[157] G. Hardin. The tragedy of unmanaged commons. *trends Ecol. Evol.*, 9 :199–199, 1994.

[158] Harvard University. *50th congress of the International Institute of Public Finance*, 22-25 August 1994.

[159] Klaus Hasselmann. Are we seeing global warming? *Science*, 276(5314) :914–915, 1997. Enhanced electronic version.

[160] Klaus Hasselmann and Ulrich Cubasch. Anthropogenic impact on climate. In GMBH [119].

[161] Klaus Hasselmann and Susanne Hasselmann. Multi-actor optimization of greenhouse gas emission path using coupled integral climate response and economic models. Send with best regards, jun 14 1996.

[162] Klaus Hasselmann, Susanne Hasselmann, Ralf Giering, Victor Ocana, and Hans von Storch. Optimisation of CO_2 emissions using coupled integral climate response and simplified cost models. a sensitivity study. Technical Report 192, Max-Plank-Intitut fur Meteorologie in Hamburg, mar 1996.

[163] Klaus Hasselmann and Eric Kreileman. The global climate system : Near term action for the long term protection. In *Energy Modelling Forum 14 - Meeting #4 - Integrated assessment of climate change* [90].

[164] Werner Hediger. On the opportunity cost of climate change and policy. In *Swiss Topical Workshop on Decision Making Under Uncertainty and Climate Change Risk Economics* [225]. Published by the Paul Scherrer Institut, Environmental Economics.

[165] M. Heimann. *The global carbon cycle.* NATO ASI series. Spriger Verlag, Berlin Heidelberg, 1993.

[166] M. Hellster. ? *Journal of Environmental Economics and Management*, 17(3) :311–312, 1989.

[167] Claude Henry. Investment decisions under uncertainty : The "irreversibility effect". *American Economic Review*, 64(6) :1006–1012, 1974.

[168] Claude Henry. Option values in the economics of irreplaceable assets. In *Symposium on the economics of exhaustible resources* [196], pages 89–104.

[169] Claude Henry. Critères simples pour la prise en compte du risque. *Econometrica*, 49(1) :153–170, 1981.

[170] Claude Henry and Guy Laroque. Economie de l'incertain. Cours de l'Ecole Polytechnique., 1991.

[171] Ronald W. Hilton. The determinants of information value : Synthetizing some general results. *Management Science*, 27 :57–64, 1981.

[172] J. Hirshleifer and J. G. Riley. *The Analytics of Uncertainty and Information.* Cambridge University Press, 1992.

[173] William W. Hogan. OECD oil demand dynamics : Trends and asymetries. *The Energy Journal*, 14(1) :125–157, 1992.

[174] Olav Hohmeyer, Richard L. Ottinger, and Klaus Rennings, editors. *Social Costs and Sustainability - Valuation and Implementation in the Energy and Transport Sectors.* Springer, 1996.

[175] Chris Hope. A fast and simple model of global warming from greenhouse gas emissions. Research papers in management studies 1992-1993 No 2, University of Cambridge, Judge Institute of Management Studies, nov 1992.

[176] Chris Hope, John Anderson, and Paul Wenman. Policy analysis of the greenhouse effect, an application of the page model. *Energy Policy*, 21(3) :327–338, 1993. Special issue on Policy Modelling for Global Climate Change.

[177] Chris Hope and Philip Maul. Valuing the impact of CO_2 emissions. *Energy Policy*, 24(3) :211–219, 1996.

[178] H. Hotelling. The economics of exhaustible resources. *Journal of Political Economy*, 39 :137–175, 1931.

[179] Jean-Charles Hourcade. La gestion collective de l'incertitude. *Ecodécision*, pages 39–41, 1992.

[180] Jean-Charles Hourcade. Les sciences entre philosophie et mass média ou l'incertaine légitimité. *Natures - Sciences - Sociétés*, 1(4) :316–321, 1993.

[181] Jean-Charles Hourcade. Modelling long-run scenarios : methodology lessons from a prospective study on a low CO_2 intensive country. *Energy Policy*, 21(3) :309–326, 1993.

[182] Jean-Charles Hourcade. Analyse économique et gestion des risques climatiques. *Natures - Sciences - Sociétés*, 2(3) :202–211, 1994.

[183] Jean-Charles Hourcade. Environnement : de Rio à Berlin. *Projet*, 242 :109–114, 1995.

[184] Jean-Charles Hourcade. Integrated assessment and integrated modelling : some insights. A working note for the Workshop on Integrated Assesment European Comission, may 1995.

[185] Jean-Charles Hourcade. Integrated assessment and integrated modelling : Some insights. In *Workshop on Integrated Environmental Assessmen* [101].

[186] Jean-Charles Hourcade. Quelques éléments de cadrage sur les écotaxes et la réforme fiscale. Document interne CIRED, may 9 1995.

[187] Jean-Charles Hourcade. Compte rendu ce la réunion du 20 mars 1997, autour de l'appui du gdr oikia à la négociation de kyoto. Technical report, Centre International de Recherches sur l'Environnement et le Développement, may 1997.

[188] Jean-Charles Hourcade and Richard Baron. Traitement de l'innovation et evaluation des cots à long terme de la réduction des emissions de CO_2. *Revue de l'Energie*, 426 :42–52, 1991.

[189] Jean-Charles Hourcade and Thierry Chapuis. No-regret potentials and technical innovation. *Energy Policy*, 23(4/5) :433–445, 1995.

[190] Jean-Charles Hourcade and Ha Duong Minh. Uncertainties, induced technical change and timing of actions. In Sors et al. [372].

[191] Jean-Charles Hourcade, Franck Lecocq, and Naceur ben Chaabane. Cost of inertia, nature and timing of decisions : some lessons from numerical experiments with starts. Communication présentée à Vienne, circa 1996.

[192] Jean-Charles Hourcade, Gérard Mégie, and Jacques Theys. Politiques énergétiques et risques climatiques. Comment gérer l'incertitude ? *Futuribles*, 135 :35–60, 1989.

[193] Jean-Charles Hourcade and Jean-Michel Salles. Economics and environmental issues : lessons from a recent controversy in europe. Publié finalement comme "Ecological economics and scientific controversies.", Ecological Economics 6(1992), 211-233., mar 1991.

[194] Jean-Charles Hourcade, Jean-Michel Salles, and Daniel Thery. Ecological economics and scientific controversies, lessons from some recent policy making in the EEC. *Ecological Economics*, 6 :211–233, 1992.

[195] Richard B. Howarth. Climate change and overlapping generations. *Contemporary Economic Policy*, 14(4) :0–0, 1996.

[196] Inconnu. *Symposium on the economics of exhaustible resources*, ? 1974.

[197] Inconnu. *Brookings Papers on Economic Activity*. ?, 1 : 1989.

[198] Inconnu. *Géopolitique de l'Environnement et Nouvel Ordre Mondial : Limites, Conflits, Insécurité ?*, jan 6-9 1993.

[199] Inconnu. *Autumn Worshop in Environmental Economics*, 29/9 - 5/10, année inconnue 1995.

[200] INSEE, editor. *Environnement et Economie*. Number 39-40 in Insee Méthodes. INSEE, Paris, dec 1993.

[201] Intergovernmental Panel of Climate Change. *Climate Change - The IPCC Impacts Assessment*. Department of the Arts, Sport, the Environment, Tourism and Territories, Australian Government Publishing Services, juin 1990. Disponible aussi en français sous le titre "Incidences Potentielles du Changement Climatique".

[202] Intergovernmental Panel of Climate Change. *Climate Change - The IPCC Response Strategies*. UNEP and WMO, 1990.

[203] Intergovernmental Panel of Climate Change. *Climate Change - The IPCC Scientific Assessment*. Cambridge University Press, 1990. ISBN paperback 0 521 40720 6.

[204] Intergovernmental Panel of Climate Change. *Premier rapport d'évaluation de l'IPCC, Aperçu général, Résumés destiné aux décideurs - Groupe de travail I, II, III et comité spécial pour la participation des pays en développement*, volume I. OMM - PNUE, aout 1990.

[205] Intergovernmental Panel of Climate Change. Estimation of greenhouse gas emissions and sinks. Technical report, Organisation de Coopération et du Développement Economique, aug 1991. Final report, from OECD Experts Meeting, 18-21 février 1991.

[206] Intergovernmental Panel of Climate Change. *Climate Change 1992 - The Supplementary Report to the IPCC Scientific Assessment, Combined with Supporting Scientific Material*. Cambridge University Press, 1992.

[207] Intergovernmental Panel of Climate Change. *Climate Change 1994, Radiative Forcing of Climate Change and An Evaluation of the IPCC IS92 Emission Scenarios*. Cambridge University Press, 1994. ISBN hardback 0 521 55055 6.

[208] Intergovernmental Panel of Climate Change. *Climate Change 1995 - Economic and Social Dimensions of Climate Change, Contribution of Working Group III to the Second Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change.* Cambridge University Press, Cambridge, Massachussets, 1996.

[209] Intergovernmental Panel of Climate Change. *Climate Change 1995 - Impacts, Adaptations and Mitigation of Climate Change, Contribution of the Working Group II to the Second Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change.* Cambridge University Press, 1996. Paperback ISBN 0-521-56437-9.

[210] Intergovernmental Panel of Climate Change. *Climate Change 1995 - The Science of Climate Change, Contribution of the Working Group I to the Second Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change.* Cambridge University Press, 1996. Paperback ISBN 0-521-56436-0.

[211] Intergovernmental Panel of Climate Change. *Deuxième rapport d'évaluation du GIEC, Changements climatiques 1995. Un rapport du Groupe d'Experts Intergouvernemental sur l'évolution du climat.* IPCC, 1996. Document de synthèse et trois résumés. Disponible aussi en Anglais.

[212] Intergovernmental Panel of Climate Change. 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. In *Deuxième rapport d'évaluation du GIEC* [211], pages 2–18. Document de synthèse et trois résumés. Disponible aussi en Anglais.

[213] Intergovernmental Panel of Climate Change. *Techniques, politiques et mesures d'atténuation du changement climatique.* Number I in Document technique du GIEC. IPCC, nov 1996. Disponible aussi en anglais et dans d'autres langues. En ligne à www.ipcc.ch.

[214] Intergovernmental Panel of Climate Change. *Introduction aux modèles climatiques simples employés dans le Deuxième Rapport d'évaluation du GIEC.* Number II in Document technique du GIEC. IPCC, fev 1997. Disponible aussi en anglais et dans d'autres langues.

[215] Intergovernmental Panel of Climate Change. *IPCC Asia-Pacific Workshop on Integrated Assessment Models*, 10-12 mar 1997.

[216] Intergovernmental Panel of Climate Change. *Stabilisation des gaz atmosphériques à effet de serre : conséquences physiques, biologiques et socio-économiques.* Number III in Document technique du GIEC. IPCC, fev 1997. Disponible aussi en anglais et dans d'autres langues.

[217] International Association of E ? E ? *IAEE 17th Annual International Conference*, may 25-27 1994.

[218] International Institute of Applied System Analysis. *Integrative Assessement of Mitigation, Impacts, and Adaptation to Climate Change*, 13-15 october 1993.

[219] International Institute of Applied System Analysis. *International Energy Workshop - June 95*, 20-22 June 1995.

[220] International Institute of Applied System Analysis. *Meeting of the Inernational Energy Workshop*, 20-22 June 1995.

[221] International Institute of Applied System Analysis. *Induced Technical Change and the Environment*, jun 25-27 1997.

[222] International Institute of Applied System Analysis. *Workshop on Induced Technological Change and the Environment*, June 26-27 1997.

[223] IPCC, Working Group I. Résumé à l'intention des décideurs : aspects scientifique de l'évolution du climat. In *Deuxième rapport d'évaluation du GIEC* [211], pages 19–24. Document de synthèse et trois résumés. Disponible aussi en Anglais.

[224] IPCC, Working Group II. Résumé à l'attention des décideurs : analyse scientifique et technique des incidences de l'évolution du climat, mesures d'adaptation et d'atténuation. In *Deuxième rapport d'évaluation du GIEC* [211], pages 25–42. Document de synthèse et trois résumés. Disponible aussi en Anglais.

[225] IPCC, Working Group III. *Swiss Topical Workshop on Decision Making Under Uncertainty and Climate Change Risk Economics*, March 3-6 1994.

[226] Michael Jefferson. Carbon dioxide emissions 1990-1996. *World Energy Council Journal*, pages 76–82, 1997. Also available electronically on www.wec.co.uk.

[227] E. Jochem and B. Strobel. Resilient technical options and policy strategies of climate change policy in the context of manifold uncertainties. In *Uncertainty and Energy Policy Choices to Meet UNFCCC Objectives, Third IEA Modelling Seminar* [3].

[228] R. Jones and J. Ostroy. Flexibility and uncertainty. *Review of Economic Studies*, 51 :13–32, 1984.

[229] Dale W. Jorgenson and Peter J. Wilcoxen. Intertemporal equilibrium modeling of energy and environmental policies. In *50th congress of the International Institute of Public Finance* [158].

[230] Thomas Karl, Neville Nicholls, and Jonathan Gregory. Le climat de demain. *Pour la Science*, 237 :38–43, 1997.

[231] Y. Kaya, N. Nakicenovic, William D. Nordhaus, and Ferenc L. Toth, editors. *Workshop on Costs, Impacts and Possible Benefits of CO_2 mitigation*. International Institute of Applied System Analysis, IIASA, September 28-30 1992.

[232] David L. Kelly and Charles D. Kolstad. The climate change footprint : will we see it before it is upon us ? In *Energy Modelling Forum 14 - Meeting #4 - Integrated assessment of climate change* [90].

[233] David L. Kelly and Charles D. Kolstad. The climate change footprints : will we see it before it is upon us ? Working paper in Economics #3 - 96, University of California in Santa Barbara, Department of Economics, 1996.

[234] Veikko Kernen, Peter Mitic, and A. Hietamki, editors. *Second International Mathematica Symposium*. Rovaniemi Polytechnic, Rovaniemi Institute of Technology, Computational Mechanics Publication, 29/6/1997 - 4/7/1997 1997.

[235] Richard A. Kerr. The right climate for assessment. *Science*, 277(5334) :1916–1918, 1997.

[236] John D. Kinsman and Gregg Marland. Contribution of deforestation to atmospheric CO_2 and reforestation as an option to control CO_2. In *Air & Waste Management Association 82nd annual meeting & exhibition* [4].

[237] F. H. Knight. *Risk, Uncertainty and Profit*. Houghton Mifflin, Boston, 1921.

[238] Mary F. Kokoski and Kerry V. Smith. A general equilibrium analysis of partial equilibrium welfare measures : the case of climate change. *American Economic Review*, 77(3) :331–341, 1987.

[239] Charles D. Kolstad. Looking vs. leaping : the timing of CO_2 control in the face of uncertainty and learning. In Kaya et al. [231].

[240] Charles D. Kolstad. George Bush versus Al Gore. Irreversibilities in the greenhouse gas accumulation and emission control invesment. *Energy Policy*, 22(9) :771–778, 1994.

[241] Charles D. Kolstad. Fundamental irreversibilities in stock externalities. *Journal of Public Economics*, 60 :221–233, 1996.

[242] Charles D. Kolstad. Learning and stock effects in environmental regulation : The case of greenhouse gas emisions. *Journal of Environmental Economics and Management*, 31 :1–18, 1996.

[243] John V. Krutilla. Conservation reconsidered. *American Economic Review*, LVII(4) :777–786, 1967.

[244] Jean-Jacques Laffont. *Economie de l'Incertain et de l'Information, Cours de Microéconomie Théorique*, volume Vol. 2 of *Collection "Economie et Statistiques Avancées"*. Economica, Paris, 1991.

[245] Jean-Jacques Laffont. *Equivalents Certains*, chapter 3, pages 39–51. Volume Vol. 2 of *Collection "Economie et Statistiques Avancées"* [244], 1991.

[246] L. Landau and E. Lifchitz. *Physique statistique., Physique théorique, Tome V*. Editions de moscou. Editions MIR, Moscou, 1967. Traduction Anne Sokova.

[247] Bruce A. Larson. Principles of stochastic dynamic optimization in resource management : the continuous-time case. *Agricultural Economics*, 7 :91–107, 1992.

[248] Daniel A. Lashof and Dilip R. Ahuja. Relative contributions of greenhouse gas emissions to global warming. *Nature*, 344 :529–5311, 1990.

[249] Yann Laurans. *La modélisation économique de la coopération internationale pour le cas de l'effet de serre.* Thèse de doctorat, Université de Paris I Panthéon-Sorbonne, UFR 02, 1996. Directeur de Recherche : Pr. René Passet.

[250] Lester B. Lave, Hadi Dowlatabadi, Gregory J. McRae, M. Granger Morgan, and S. Edward Rubin. Uncertainties of climate change. *Nature*, 355 :197–197, 1992.

[251] Hervé Le Bras. *Les limites de la planète, Mythes de la nature et de la population.* Flammarion, Paris, mai 1994.

[252] Pierre Le Hir. L'océanographie mise à contribution pour etudier le climat de la planète. *Le Monde*, pages 21–21, 1997.

[253] Franck Lecocq and Jean-Charles Hourcade. Note de présentation du modèle starts. Présentation au séminaire Développement Viable, mar 3 1997.

[254] Franck Lecocq, Jean-Charles Hourcade, and Ha Duong Minh. Sectoral implications of the when flexibility. Submitted to Energy Economics, 4 dec 1997.

[255] Franck Lecocq, Jean-Charles Hourcade, and Ha Duong Minh. Sectoral implications of the when flexibility. *Energy Economics*, pages 1–22, 1998. Accepted.

[256] Bo Lim, Pierre Boileau, and Yamil Bonduki. The ipcc/oecd/iea greenhouse gas inventories programme : International methods for the estimation, monitoring and verification fo ghg emission inventories. In GMBH [119].

[257] Robert C. Lind. Intergenerational equity, discounting and the role of cost benefit analysis in evatuating global climate policy. In *Integrative Assessement of Mitigation, Impacts, and Adaptation to Climate Change* [218].

[258] Linda Little. Computational platforms : setting the stage for simulation. *The Bulletin of the Santa Fe Institute*, pages 13–19, 1993.

[259] Jane Lubchenco. Entering the century of the environment : A new social contract for science. *Science*, 279 :491–497, 1998.

[260] Robert E. Lucas, Jr. On the mechanics of economic development. *Journal of Monetary Economics*, 22 :3–42, 1988.

[261] Wolfgang Lutz. *The Future Population of the World, What can we assume today ? Revised and Updated Edition.* Earthscan in association with IIASA, London, 1996.

[262] Nick Mabey. Unpacking climate precaution : Theory and practice in decision making under uncertainty. In *Uncertainty and Energy Policy Choices to Meet UNFCCC Objectives, Third IEA Modelling Seminar* [3]. WWF-UK.

[263] M. J. Machina. Dynamic consistency and non-expected utility models of choice under uncertainty. *Journal of Economic Litterature*, 27 :1622–1668, 1989.

[264] Asatoshi Maeshiro. Classification system for journal articles. *Journal of Economic Litterature*, pages 389–400, 1994.

[265] J. D. Mahlman. Uncertainties in projections of human-caused climate warming. *Science*, 278(5342) :1416–1417, 1997.

[266] E. Malinvaud. First order certainty equivalent. *Econometrica*, 37 :706–718, 1969. In ? ? ? (voir Pierre Matarasso).

[267] Thomas Robert Malthus. *Essai sur le principe de population (ed. 1798)., en tant qu'il influe sur le progrès futur de la société avec des remarques sur les théories de M. Godwin, de M. Condorcet et d'autres auteurs.* INED, Paris, 1980.

[268] Thomas Robert Malthus. *Essai sur le Principe de Population (éd. 1803) I, ou exposé des effets passés et présents de l'action de cette cause sur le bonheur du genre humain, suivi de quelques recherches relatives à l'espérance de guérir ou d'adoucir les maux qu'elle entraîne.*, volume 1. GF-Flammarion, Paris, jean-paul maréchal edition, 1992. Traduction P. et G. Prevost.

[269] Thomas Robert Malthus. *Essai sur le Principe de Population (éd. 1803) II, ou exposé des effets passés et présents de l'action de cette cause sur le bonheur du genre humain, suivi de quelques recherches relatives à l'espérance de guérir ou d'adoucir les maux qu'elle entraîne.*, volume 2. GF-Flammarion, Paris, jean-paul maréchal edition, 1992. Traduction P. et G. Prevost.

[270] Syukuro Manabe and Ronald J. Stouffer. Simulation of abrupt climate change induced by freshwater input to the north atlantic ocean. *Nature*, 378 :165–167, 1995.

[271] Alan S. Manne. Costs and benefits of alternative CO_2 emissions reductions strategies. Note for presentation at ACCF, September 13, 1995, aug 1995.

[272] Alan S. Manne. Guidelines for scenarios. Document de travail du EMF 14 Subgroup - Analysis for Decision under Uncertainty, jun 9 1995.

[273] Alan S. Manne. Hedging strategies for global carbon dioxide abatement. a summary of poll results. Document de travail du EMF 14 Subgroup – Analysis for Decisions under Uncertainty, apr 1996.

[274] Alan S. Manne. Hedging strategies for global carbon dioxide abatement : a summary of poll results. EMF 14 subgroup - analysis for decisions under uncertainty. In *Energy Modelling Forum 14 - Meeting #4 - Integrated assessment of climate change* [90].

[275] Alan S. Manne and Richard Richels. *Buying Greenhouse Insurance : The Economic Cost of CO_2 Emissions Limits*. MIT Press, 1992.

[276] Alan S. Manne and Richard Richels. The greenhouse debate - economic efficiency, burden sharing and hedging strategies. In *Meeting of the Inernational Energy Workshop* [220].

[277] Alan S. Manne and Richard Richels. The Berlin Mandate : the costs of meeting post-2000 targets and timetables. *Energy Policy*, 24(3) :205–210, 1996.

[278] C. Marchetti and Nebojša Nakićenović. The dynamics of energy systems and the logistic substitution model. Technical Report RR-79-13, International Institute of Applied System Analysis, dec 1979.

[279] Jean-Marie Martin. L'intensité énergétique de l'activité économique dans les pays industrialisés : les évolutions de très longue période livrent elle ... *Economie et Société*, 41 :9–27, 1988.

[280] Yves Victor Martin. Note sur les 'actions conjointes' ('joint implementation') visées au paragraphe 2a de l'article 4 de la convention cadre sur les changements climatique. Note adressée à la Mission Interministérielle sur l'Effet de Serre pour la préparation de la conférence de Kyoto., jul 29 1993.

[281] Pierre Matarasso. Quelques remarques sur l'intégration des modèles climatiques, biophysiques et economiques dans le cadre des recherches sur l'environnement. In Blasco [31]. p. 197-206.

[282] Pierre Matarasso. Conception du temps et modélisation : l'apport récent des modèles intégrés planétaires du changement global, temps des phénomènes et temps de la décision. Document de travail du CIRED, 1997.

[283] Gail McDonald. Statement responding to the 'scientists' statement on global climatic disruption. Online from the Global Climate Coalition site at www.worldcorp.com/dc-online/gcc/gailstatement.htm, jun 18 1997.

[284] D. H. Meadows. *The limits to Growth*. Universe Books, 1972.

[285] Gérard Mégie. Incertitude scientifique et décision politique : le cas "historique" de l'ozone stratosphérique. Projet de recherche avec le CIRED., circa 1995.

[286] Gérard Mégie. La couche d'ozone, de l'équilibre naturel aux perturbations anthropiques. *Revue du Palais de la Découverte*, 24(233) :25–42, 1995.

[287] Robert Mendelsohn, Richard Adams, John M. Callaway, Brian Hurd, Bruce McCarl, Wendy Morrison, Kathleen Segerson, Brent Sohngen, and Gary Yohe. The economics impacts of climate change in the us. Paper presented at CIRAD, Paris, under the Chatam House rule of confidentiality, jun 11 1996.

[288] Sabine Messner. Endogeneized technological learning in an energy systems model. Iiasa working paper, International Institute of Applied System Analysis, nov 1995.

[289] Sabine Messner. Endogenizd technological learning in an energy systems model. In *Energy Modelling Forum 14 - Meeting #4 - Integrated assessment of climate change* [90].

[290] Sabine Messner, A. Golodnikov, and A. Gritsevskii. A stochastic version of the dynamic linear programming model MESSAGE III. *Energy*, 21(9) :775–784, 1996.

[291] Patrick Michaels. All climate disasters point to kyoto. *World Climate Report*, 3(7) :1–1, 1997. En ligne à http ://www.nhes.com, accès 20/12/97.

[292] Jon R. Miller and Frank Lad. Flexibility, learning, and irreversibility in environmental decisions : A bayesian approach. *Journal of Environmental Economics and Management*, 11 :161–172, 1984.

[293] Ministère de l'Agriculture et de la Forêt. Effet de serre, forêt et bois. Technical report, Ministère de l'Agriculture et de la Forêt, apr 20 1990. Rapport d'analyse et de propositions.

[294] Mission Interministérielle de l'Effet de Serre. Executive summary of the national communication of france submitted under articles 4 and 12 of the unfccc. Technical Report FCCC/NC/11, Mission Interministérielle de l'Effet de Serre, nov 21 1995. Original : English and French. Source http ://www.unfccc.de/fccc/docs/nc/fra01.pdf.

[295] Tsuneyuki Morita, Mikiko Kainuma, and Yuzuru Matsuoka. A guide to the AIM/ENDUSE model - technology selection program with linear programming. In *Energy Modelling Forum 14 - Meeting #4 - Integrated assessment of climate change* [90].

[296] Tsuneyuki Morita, Yuzuru Matsuoka, and Mikiko Kainuma. Long term global scenarios based on the AIM model. In *Energy Modelling Forum 14 - Meeting #4 - Integrated assessment of climate change* [90]. AIM interim paper IP-95-03.

[297] Marc Mormont. Expertise scientifique et action publique : Le cas du changement climatique dans trois pays européens. *Natures - Sciences - Sociétés*, 3(1) :16–25, 1995.

[298] Javier F. Mory. Oil prices and economic activity : Is the relationship symmetric ? *The Energy Journal*, 14(4) :151–161, 1993.

[299] Fiona Mullins and Richard Baron. International ghg emission trading. Policy & Measures for Common Action Working Paper 9, Agence Internationale de l'Energie, OCDE, mar 1997.

[300] Nebojša Nakićenović. Software package for the logistic substitution model. Technical Report RR-79-12, International Institute of Applied System Analysis, dec 1979.

[301] Nebojša Nakićenović. Freeing energy from carbon. Technical Report RR-97-1, International Institute of Applied System Analysis, jan 1997. Reprinted from Daedalus, from the issue entitled "The Liberation of the Environment", Summer 1996, Volume 125, n 3, pp. 95-112.

[302] Pierre Naslin. Faut il craindre l'effet de serre ? *La Jaune et la Rouge*, 521 :16–21, 1997.

[303] William D. Nordhaus. The cost of slowing climate change : a survey. *The Energy Journal*, 12(1) :37–65, 1991.

[304] William D. Nordhaus. To slow or not to slow : the economics of the greenhouse effect. *The Economic Journal*, 101 :920–937, 1991.

[305] William D. Nordhaus. An optimal transition path for controlling greenhouse gases. *Science*, 258 :1315–1319, 1992.

[306] William D. Nordhaus. Expert opinion on climate change. *American Scientist*, 82(1) :45–51, 1994.

[307] William D. Nordhaus. *Managing the Global Commons, The Economics of Climate Change*. The MIT Press, Cambridge, Massachusetts, 1994.

[308] William D. Nordhaus and David Popp. What is the value of scientific knowledge ? An application to global warming using the PRICE model. In *Energy Modelling Forum 14 - Meeting #4 - Integrated assessment of climate change* [90].

[309] William D. Nordhaus and Zili Yang. RICE : a regional dynamic equilibrium model of optimal climate-change policy. In *Meeting of the Inernational Energy Workshop* [220].

[310] William D. Nordhaus and Zili Yang. A regional dynamic general-equilibrium model of alternative climate-change strategies. *American Economic Review*, 86(4) :741–765, 1996.

[311] William D. Nordhaus and Zili Yang. RICE : a regional dynamic general equilibrium model of optimal climate change policy. In *Energy Modelling Forum 14 - Meeting #4 - Integrated assessment of climate change* [90].

[312] Wallace E. Oates, editor. *The Economics of the Environment*. The International Library of Critical Writings in Economics. An Elgar Reference Collection. Elgar, 1992.

[313] H. Oeschger and M. Heimann. Uncertainties of predictions of future atmospheric CO_2 concentrations. *Journal of Geophysical Research*, 88 C(2) :1258–1262, 1983.

[314] H. Oeschger, Ulrich Siegenthaler, U. Schotterer, and A. Gugelmann. A box diffusion model to study the carbon dioxyde exchange in nature. *Tellus*, XXVII(2) :168–192, 1975.

[315] Matthew Oravetz and Hadi Dowlatabadi. Is there autonomous energy efficiency improvement ? Carnegie Mellon University, circa 1997.

[316] Organisation de Coopération et du Développement Economique. *OECD conference on Sustainable Economic Development*, may 24-25 1993.

[317] Ian W. H. Parry. Some estimates of the insurance value against climate change from reducing greenhouse gas emissions. *Resource and Energy Economics*, 15 :99–115, 1993.

[318] Oren Patashnik. *BibTeXing*, feb 8 1988.

[319] David W. Pearce. Economists and climate change. *Environment and Planning A*, 29(1) :1–1, 1997.

[320] David W. Pearce and Kerry R. Turner. *Economics of Natural Resources and the Environment.* Harvester Wheatsheaf, 1990.

[321] Fred Pearce. L'effet de serre, une lubie scientifique. *Courrier International*, 356 :33–35, 1997. Traduit de New Scientist.

[322] Stephen C. Peck. Candidate framework for analysis of climate change decisions and uncertainties. feb 16 1994.

[323] Stephen C. Peck and Thomas J. Teisberg. Summary of global warming uncertainties and the value of information : an analysis using CETA. In Kaya et al. [231].

[324] Stephen C. Peck and Thomas J. Teisberg. Global warming uncertainties and the value of information : An analysis using ceta. *Resource and Energy Economics*, 15 :71–97, 1993.

[325] Stephen C. Peck and Thomas J. Teisberg. The importance of nonlinearities in global warming damage costs. In Darmstadter and Toman [76].

[326] Stephen C. Peck and Thomas J. Teisberg. Optimal CO_2 control policy with stochastic losses from temperature rise. oct 14 1994.

[327] Stephen C. Peck and Thomas J. Teisberg. Uncertainty and the value of information with stochastic losses from global warming. In *Meeting of the Inernational Energy Workshop* [220].

[328] Irene Peters. The role of technical progress in economic models of environmental policy. In Hohmeyer et al. [174]. Presented at the Third International Workshop on Externality Costs, Ladenburg, Germany, May 1995.

[329] Gonzague Pillet and Fritz Gassmann. Steps toward a decision making framework to adress climate change. report from the montreux ipcc wg iii writing team ii meeting, march 3-6, 1996. PSI Bericht Nr. 94-10, Paul Scherrer Institut, Environmental and Systems Analysis Laboratory, sep 1994. ISSN 1019-0643.

[330] Robert S. Pindyck. Irreversibility, uncertainty, and investment. *Journal of Economic Litterature*, XXIX :1110–1148, 1991.

[331] Erica L. Plambeck and Chris Hope. PAGE95 an updated valuation of the impacts of global warming. In *Energy Modelling Forum 14 - Meeting #4 - Integrated assessment of climate change* [90].

[332] M. L. Plumma and R. C. Hartman. Option value : a general approach. *Economic Inquiry*, 24 :455–471, 1986.

[333] Colin Price. Emissions, concentrations and disappearing CO_2. *Resource and Energy Economics*, 17 :87–97, 1995.

[334] Stefan Rahmstorf. Bifurcations of the atlantic thermohaline circulation in response to changes in the hydrological cycle. *Nature*, 378 :145–149, 1995.

[335] Howard Raiffa. *Analyse de la Décision, Introduction aux Choix en Avenir Incertain.* Number 25 in Collection SIGMA dirigée par Henri Hierche. Dunod, Paris, 1973. Traduit par Yann de Calan et Hubert de Carpentier.

[336] Shyama Ramani, Richard Alban, and Michel Trommetter. Une approche élargie de l'effet d'irreversibilité. Application au cas de la conservation de la biodiversité. *Revue Economique*, 4 :769–784, 1992.

[337] Franck Plumpton Ramsey. A mathematical theory of savings. *Economics Journal*, 38 :543–559, 1928.

[338] Robert Repetto and Crescencia Maurer. U.s. competitiveness is not at risk in the climate negociations. online ¡http ://www.wri.org/wri/cpi/notes/comp-us.html, oct 1997.

[339] Ressources For the Future. *Discounting in Intergenerational Decisionmaking*, November 14-15 1996.

[340] Richard Richels and Jae A. Edmonds. The economics of stabilizing atmospheric CO_2 concentrations. *Energy Policy*, 23(4/5) :373–378, 1995.

[341] Richard Richels, Jae A. Edmonds, Howard Gruenspecht, and T. M. L. Wigley. The berlin mandate : The design of cost-effective mitigation strategies. In *Energy Modelling Forum 14 - Meeting #4 - Integrated assessment of climate change* [90].

[342] Paul Romer. Endogenous technological change. *Journal of Political Economy*, 94 :1002–1037, 1990.

[343] J. Rotmans. *IMAGE : an Integrated Model to Assess the Greenhouse Effect.* Kuwler Academic Publisher, 1990.

[344] Sherwood F. Rowland. L'evolution de l'atmosphère. *Notre Planète*, 9(2) :4–6, 1997. Voir aussi le supplément spécial Action Ozone No 4 sur "L'épreuve du gel de 1999".

[345] S. E. Rubin, N. Cooper, F. A. R. Richerd, H. T. Lee, G. Marland, H. A. Rosenfeld, and D. D. Stine. Realistic mitigation options for global warming. *Science*, 257 :148–265, 1992.

[346] David Ruelle. *Hasard et chaos.* Sciences. Editions Odile Jacob, Paris, Aot 1991.

[347] Jean-Michel Salles. Les enjeux économiques des risques globaux d'environnement. *Natures - Sciences - Sociétés*, 1(2) :108–117, 1993.

[348] Jayant Sathaye, Richard B. Norgaard, and Willy Makundi. A conceptual framework for the evaluation of cost-effectiveness of projects to reduce ghg emissions and sequester carbon. Technical report, Lawrence Berkeley Laboratory, UC, Energy and Environment Division, jul 1993.

[349] Lee Schipper, Michael Ting, Marta Khrushch, Fridtjof Unander, Patricia Monahan, and William Golove. The evolution of carbon dioxide emissions from energy use in industrialised countries. an end-use analysis. Draft, do not cite or quote. Ref LBL-38574, UC-000, jun 1996.

[350] Jacob M. Schlesinger. Cette vertu appelée flexibilité. *Courrier International*, 350 :24–24, 1997. Encadré extrait de The Wall Street Journal, New York, faisant partie d'un dossier sur le capitalisme américain.

[351] Michael E. Schlesinger. Development of the geographical climate scenarios for the impact analyses of emf14 - integrated assessment of climate change. In *Energy Modelling Forum 14 - Meeting #4 - Integrated assessment of climate change* [90].

[352] R. Schmalensee. Option value and consumer surplus : valuing price changes under uncertainty. *American Economic Review*, 62 :813–824, 1972.

[353] Stephen H. Schneider. Climate change : Causes, impact and uncertainties. In *U.S. Senate Hearings on Climate Change* [363]. Online at www.senate.gov.

[354] Stephen H. Schneider and Lawrence H. Goulder. Achieving low-cost emissions targets. *Nature*, 389 :13–14, 1997.

[355] E. P. Schroeder, K. R. Dixon, and K. J. Winjum. L'aménagement des forêts et l'agroforesterie pour piéger et conserver le dioxyde de carbone atmosphérique. *Unasylva*, 44(173) :52–60, 1993.

[356] Peter A. Schultz and James F. Kasting. Optimal reductions in CO_2 emissions. *Energy Policy*, 25(5) :491–500, 1997.

[357] Joseph A. Schumpeter. The analysis of economic change. *The Review of Economic Statistics*, XVII(4) :4–12, 1935.

[358] Stephen E. Schwartz and Meinrat O. Andreae. Uncertainty in climate change caused by aerosols. *Nature*, 272 :1121–1122, 1996.

[359] Roger A. Sedjo. Forests to offset the greenhouse effect. *Journal of Forestry*, pages 12–15, 1989.

[360] Roger A. Sedjo. The global carbon cycle : Are forests the missing sink ? *Journal of Forestry*, 88(10) :33–34, 1990.

[361] Roger A. Sedjo. Global change and the carbon cycle in terrestrial ecosystems. In *AAAS Annual Meeting* [9].

[362] P. J. Sellers, R. E. Dickinson, D. A. Randall, A. K. Betts, F. G. Hall, J. A. Berry, G. J. Collatz, A. S. Denning, H. A. Mooney, C. A. Nobre, N. Sato, C. B. Field, and A. Henderson-Sellers. Modeling the exchanges of energy, water and carbon between continents and the atmosphere. *Science*, 275(5299) :502–509, 1997.

[363] Senate of the United States of America. *U.S. Senate Hearings on Climate Change*, jul 10 1997.

[364] Jason F. Shogren and Thomas D. Crocker. Adaptation and the option value of uncertain environmental resources. *Ecological Economics*, 2 :301–310, 1990.

[365] P. R. Shukla. When and where aspects of climate change mitigation actions : A developing country perspective. In Sors et al. [372].

[366] P. R. Shukla. Implications of uncertainties on indian energy system and emissions. In *Uncertainty and Energy Policy Choices to Meet UNFCCC Objectives, Third IEA Modelling Seminar* [3].

[367] Ulrich Siegenthaler. Modelling the present-day oceanic carbon cycle. In *The global carbon cycle* [165], pages 367–395.

[368] Herbert A. Simon. Dynamic programming under uncertainty with a quadratic criterion function. In *Models of bounded rationnality* [369], chapter 2.6, pages 227–234. Econometrica, 24, 74-81, 1956.

[369] Herbert A. Simon. *Models of bounded rationnality, Economic analyses and Public Policy.* vol 1. MIT Press, 1982.

[370] Herbert A. Simon. Reply : Surrogates for uncertain decision problems. In *Models of bounded rationnality* [369], chapter 2.7, pages 235–247. unpublished ONR Research Memorandom #38, GSIA-CIT, january 1956.

[371] Robert M. Solow. Technical progress, capital formation, and economic growth. *American Economic Review*, 52(1/2) :76–86, 1962.

[372] A. Sors, Angela Liberatore, S. Funtowicz, J.-C. Hourcade, and J.-C. Felous, editors. *Prospects for Integrated Environmental Assessment : Lessons Learnt from the Case of Climate Change.* European Commission, DG XII, 24-26 Octobre 1996.

[373] Clive L. Spash and Ralph C. d'Arge. The greenhouse effect and intergenerational transfers. *Energy Policy*, 17(2) :88–96, 1989. Special issue on Energy and Environent edited by David Pearce.

[374] T. F. Stocker and A. Schmittner. Influence of CO_2 emission rates on the stability of the thermohaline circulation. *Nature*, 388 :862–866, 1997.

[375] Lionel Stoleru. Les trois pièges de kyoto. *Le Monde*, pages 17–17, 1997.

[376] Stephen K. Swallow. Depletion of the environmental basis for renewable resources : the economics of interdependent renewable and nonrenewable resources. *Journal of Environmental Economics and Management*, 19 :281–296, 1990.

[377] Joel Swisher and Gilbert Masters. A mechanism to reconcile equity and efficiency in global climate projection : international carbon emission offsets. *Ambio*, 21(2) :154–159, 1992.

[378] Olli Tahvonen and C. Withagen. Optimality of irreversible pollution accumulation. *Journal of Economic Dynamics and Control*, 20(9-10) :1–1, 1996.

[379] Gary Taubes. Apocalypse not. *Science*, 278(5340) :1004–1006, 1997.

[380] Daniel Thery. Experts et négociation climat : une "relecture attentiste" du cycle du carbone et modélisation intégrée (1990-1996). In *Les Temps de l'Environnement, Journées du Programme Environnement, Vie et Sociétés* [47].

[381] René Thom. *Structural Stability and Morphogenesis.* W.A. Benjamin, Inc., Reading, Massachusetts, 1975.

[382] Richard S. J. Tol. The damage costs of climate change : A note on tangibles and intangibles, applied to dice. *Energy Policy*, 22(5) :436–438, 1994.

[383] Richard S. J. Tol. The climate fund. sensitivity, uncertainty and robustness analyses. Technical Report W-95/02, Vrije Universiteit in Amsterdam, Instituut vor Milieuvraagstukken, feb 1995.

[384] Richard S. J. Tol. Climate change impact and the timing of emission abatement. Rentrer en Technical Report, jun 1996.

[385] Richard S. J. Tol. Climate coalitions in an integrated assessment model. Technical report, Vrije Universiteit in Amsterdam, Instituut vor Milieuvraagstukken, sep 1997.

[386] Richard S. J. Tol. *A Decision-Analytic Treatise of the Enhanced Greenhouse Effect.* Thèse, Vrije Universiteit in Amsterdam, 7 janvier 1997. Sous la direction de prof. dr. H. Verbruggen et prof. dr. ir. P. Vellinga.

[387] Richard S. J. Tol. The marginal costs of greenhouse gas emissions. Technical report, Vrije Universiteit in Amsterdam, Instituut vor Milieuvraagstukken, nov 1997.

[388] Richard S. J. Tol. Short-term decisions under long-term uncertainty. Nota di Lavoro 90.97, Fondazione Eni Enrico Mattei, nov 1997.

[389] Richard S. J. Tol and Samuel Frankhauser. On the representation of impact in integrated assessment models of climate change. Technical Report D97/2, Vrije Universiteit in Amsterdam, Instituut vor Milieuvraagstukken, apr 1997.

[390] Michael Toman and Karen Palmer. How should an accumulative toxic substance be banned ? *Environmental and Resource Economics*, 9 :83–102, 1997.

[391] Asbjorn Torvanger. Uncertain climate change in an intergenerational planning model. *Environmental and Resource Economics*, 9 :103–124, 1997.

[392] Ferenc L. Toth, Thomas Bruckner, Hans-Martin Fssel, Marian Leimbach, and Gerhard Petschel-Held. The tolerable window approach to integrated assessments. In *IPCC Asia-Pacific Workshop on Integrated Assessment Models* [215].

[393] John R. Trabalka and David E. Reichle. *The changing carbon cycle, A global analysis.* Springer Verlag, circa 1990.

[394] Nicolas Treich. *Economie de l'Incertain : Analyse de la Précaution.* Thèse de doctorat en sciences economiques, Université de Toulouse, 8 décembre 1997. Rapport de Claude Henry.

[395] Nicolas Treich. Vers une théorie economique de la précaution ? *Risques*, 32 :117–130, 1997.

[396] Yacov Tsur and Amos Zemel. Accounting for global warming risks : resource management under event uncertainty. *Journal of Economic Dynamics and Control*, 20 :1289–1305, 1996.

[397] U. S. Census Bureau. Resident population projections of the united states : Middle, low, and high series, 1996-2050. Technical report, U. S. Census Bureau, mar 1996. En ligne http ://www.census.gov/population/projections/nation/npaltsrs/txt.

[398] Alistair Ulph and David Ulph. Global warming, irreversibility and learning. *The Economic Journal*, 107(442) :636–650, 1997.

[399] United Nations University. *United Nations University Conference on "Global Change and Modelling"*, October 1991.

[400] University of Maryland, Center for Global Change. *Incorporating technology issues into the consideration of policy responses to human induced climate change*, 8-10 february 1996.

[401] Julia Uppenbrink. Nota bene : Seasonal climate prediction. *Science*, 277(5334) :1952–1952, 1997.

[402] José M. Usategui. Uncertain irreversibility, information and transformation costs. *Journal of Environmental Economics and Management*, 19 :73–85, 1990.

[403] Hirofumi Uzawa. *Global warming : economic policy responses.* ?, circa 1995.

[404] Jeroen C. J. M. van den Bergh and Peter Nijkamp. Operationalizing sustainable development : dynamic ecological economic models. *Ecological Economics*, 4 :11–33, 1991.

[405] David G. Victor. Calculating greenhouse budgets. *Nature*, 347 :431–431, 1990.

[406] Kip Viscusi. Irreversible environmental investment with uncertain benefit levels. *Journal of Environmental Economics and Management*, 15 :147–157, 1988.

[407] Bruno Voituriez. L'océan et l'evolution du climat. *Revue du Palais de la Découverte*, 21(210) :43–59, 1993.

[408] John von Neumann and Oskar Morgenstern. *Theory of Games and Economic Behavior*. Princeton University Press, Princeton, 1944.

[409] B. A. Weisbrod. Collective-consumption services of individual-consumtion goods. *Quarterly Journal of Economics*, 78 :471–477, 1964.

[410] John P. Weyant. Second round study design for emf 14 : Integrated assessment of climate change. Document de travail du EMF 14, mar 3 1995.

[411] John P. Weyant. Insights from integrated assessment. In Flannery et al. [110]. ISBN 0907252 06 0.

[412] John P. Weyant. Models for second round scenario results (as of march 6, 1996). In *Energy Modelling Forum 14 - Meeting #4 - Integrated assessment of climate change* [90].

[413] John P. Weyant. Report on summer workshop on climate change impacts and integrated assessment of climate change. In *Energy Modelling Forum 14 - Meeting #4 - Integrated assessment of climate change* [90].

[414] John P. Weyant. Technological change and climate policy modeling. In *Workshop on Induced Technological Change and the Environment* [222].

[415] T. M. L. Wigley. Balancing the carbon budget. implications for projections of future carbon dioxide concentration changes. *Tellus*, 45B :409–425, 1993.

[416] T. M. L. Wigley. Implications of recent CO_2 emission-limitation proposals for stabilization of atmospheric concentrations. *Nature*, 390 :267–270, 1997. Available electronically as .pdf from Nature web site.

[417] T. M. L. Wigley and S. C. B. Raper. Implications for climate and sea level of revised IPCC emissions scenarios. *Nature*, 357 :293–300, 1992.

[418] T. M. L. Wigley, Richard Richels, and Jae A. Edmonds. Economic and environmental choices in the stabilization of atmospheric CO_2 concentrations. *Nature*, 379(6562) :240–243, 1996.

[419] Marc Willinger. Irréversibilité et cohérence dynamique des choix. *Revue d'Economie Politique*, 6 :808–832, 1996.

[420] Franz Wirl. The asymmetrical energy demand pattern : Some theoretical explanations. *OPEC Review*, 12 :345–359, 1988.

[421] Marshall Wise and Jae A. Edmonds. Efficient strategies for OECD CO_2 emissions reductions targets. In *Energy Modelling Forum 14 - Meeting #4 - Integrated assessment of climate change* [90].

[422] World Energy Council. *Energy for Tomorrow's World, The Realities, the Real Options and the Agenda for the Achievements*. Kogan Page, London, 1993.

[423] World Energy Council. Global energy perspectives to 2050 and beyond. Technical report, WEC and IIASA, 1995. Chiffres détaillés disponibles sous Access.

[424] World Energy Council. Climate change negociations : Cop-2 and beyond. Report 6, World Energy Council, sep 1996.

[425] World Ressource Institute. *The Mathematica conference*, MathSource, June 1992.

[426] World Wildlife Fund. Early action : The best insurance policy. A wwf climate change report, World Wildlife Fund, 1997.

[427] J. R. Ybema, M. Menkveld, and T. Kram. Securing flexibility in the energy system to meet future CO_2 reduction - an inventory of hedging options. In *Uncertainty and Energy Policy Choices to Meet UNFCCC Objectives, Third IEA Modelling Seminar* [3].

[428] G. W. Yohe. Uncertainty, climate change and the economic value of information. *Policy Science*, 24(3) :245–269, 1991.

[429] John W. Zillman. Atmospheric science and public policy. *Science*, 276(5315) :1084–1086, 1997.

Table des Matières

REMERCIEMENTS **3**

SOMMAIRE **5**

CHAPITRE 1. IRRÉVERSIBILITÉ ET ÉVALUATION DU CHANGEMENT CLIMATIQUE **7**

1. Introduction générale **7**
1.1. Position de ce travail 7
1.2. Le problème du changement climatique 7
1.3. Les enjeux en France et dans le monde 11
1.4. La thèse défendue ici 13

2. Problématique. **14**
2.1. Irréversibilité absolue, inertie, flexibilité et irréversibilité des choix 14
2.2. Irréversibilité thermodynamique et entropie. 17
2.3. Les figures de l'irréversibilité en économie. 19
2.4. Irréversibilité et incertitude 22
2.5. Conclusion: irréversibilités et changement climatique 26

3. Méthode: l'analyse intégrée du changement climatique **29**
3.1. Qu'est ce qu'un modèle d'évaluation intégrée du changement climatique ? 29
3.2. Nécessité des modèles intégrés 30
3.3. Conclusion : un champ de recherche en développement 32

4. Ligne directrice de notre travail **33**
4.1. Organisation du document 33
4.2. Organisation des annexes décrivant le modèle DIAM 34

CHAPITRE 2. LES CONDITIONS DU PROBLÈME DU CHANGEMENT CLIMATIQUE **37**

1. Aspects géophysiques: Un système susceptible de surprendre **37**
1.1. La détection et l'attribution du changement climatique 37
1.2. De grandes incertitudes subsistent. 40
1.3. Conclusion : le problème est réel et sérieux 42

2. Incidences de l'évolution du climat et mesures d'adaptation **51**
2.1. Des effets potentiellement importants mais difficiles à cerner. 51
2.2. Il existe des possibilités techniques d'adaptation et d'atténuation. 52
2.3. La controverse sur les dommages 53
2.4. Conclusion 55

3. Dynamiques socio-économiques et pressions sur le climat **56**
3.1. L'accroissement de la population. 56
3.2. Croissance et développement durable 60
3.3. Le découplage énergie-croissance 61
3.4. Le contenu en carbone des énergies 63
3.5. Conclusion 65

4. La répartition internationale des efforts, entre efficacité et équité. **66**
4.1. Actuellement, le poids de l'Annexe I 66
4.2. A moyen terme, le poids du développement 70
4.3. A long terme, la convergence 71

CHAPITRE 3. DU CHANGEMENT CLIMATIQUE AU PROBLÈME DE DÉCISION **77**

1. La prise en charge institutionnelle du changement climatique **77**
1.1. Les institutions impliquées 77
1.2. La Convention Cadre sur le Changement du Climat 79
1.3. Le Groupe d'experts Intergouvernemental sur l'Évolution du Climat 81

2. Aspects socio-économiques: le sans regret et au delà. 87
2.1. Les coûts de réduction 87
2.2. Les actions sans regret. 90
2.3. Le principe de précaution 94
2.4. Le progrès technique 95

3. Histoire des crises environnementales : la décision sous controverse. 97
3.1. Le modèle de décision sous controverse : définition. 97
3.2. Le processus de décision collective en univers controversé 98
3.3. Les risques de ce processus 99
3.4. Une course de vitesse entre deux irréversibilités 99

4. Conclusion : Comment agir aujourd'hui ? 100

CHAPITRE 4. DES MODÈLES D'ÉVALUATION INTÉGRÉE 105

1. L'évaluation intégrée 105
1.1. Résolution numérique plutôt qu'analytique 106
1.2. Simulation ou optimisation 108
1.3. Optimisation coût-bénéfice ou coût-efficacité 110

2. Modèles d'optimisation 111
2.1. DICE - Nordhaus 111
2.2. SLICE - Kolstad 114
2.3. Connecticut - Yohe 115
2.4. MERGE - Manne, Richels et Mendelsohn 116

3. Modèles de simulation et de viabilité 119
3.1. CRPS - Hammit et alii. 119
3.2. IMAGE 2 - Alcamo et Krol 121
3.3. ICLIPS - Toth et alii. 123
3.4. Autres modèles 125

4. Progrès technique et évaluation intégrée 126
4.1. Le changement technique induit, source d'adaptabilité à long terme 126
4.2. La représentation du progrès technique dans les modèles 128
4.3. Implications 129

CHAPITRE 5. DIAM - MODÈLE DYNAMIQUE INERTIE-ADAPTABILITÉ 135

1. Introduction 135
1.1. Cadre conceptuel 135
1.2. Cadre formel 137

2. DIAM : un Modèle sur la Dynamique de l'Inertie et de l'Adaptabilité 139
2.1. Maquette physique 139
2.2. Maquette socio-économique 141
2.3. Mode d'emploi 142

3. Paramétrisation 143
3.1. Paramètres géophysiques 143
3.2. Paramètres de la fonction d'impact 147
3.3. Echelle de la fonction de coût de réduction 148

4. Résultats et conclusions 152
4.1. Résultats 152
4.2. Discussion 159
4.3. Conclusions 162

CHAPITRE 6. DÉCISION SÉQUENTIELLE ET TIMING DES RÉDUCTIONS 165

1. La question du timing des réductions 165
1.1. La controverse sur le timing 165
1.2. Le plafond de 550 ppmv 167

1.3. Le risque de mauvaises nouvelles 168
1.4. Conclusion : « stratégie » WRE et accélération. 171

2. Stratégie de précaution et limitation de la concentration 172
2.1. Décision séquentielle et arbitrage trop tardif / trop précoce 172
2.2. Le modèle 172
2.3. Résultats : Optimisation vers un objectif connu 175
2.4. Résultats : Décision séquentielle 179

3. Approche coût (certain)-bénéfice (aléatoire) 182
3.1. Un calcul de la Valeur Espérée de l'Information Présente 182
3.2. Dommages linéaires 184
3.3. Le problème de la forme de la fonction de dommages 185
3.4. Dommages non linéaires 189

4. Conclusion : signaux et avertissement 191

CHAPITRE 7. CHANGEMENT CLIMATIQUE ET VALEUR D'OPTION 193

1. Changement climatique et effet d'irréversibilité 193
1.1. L'effet d'irréversibilité 193
1.2. Extensions 195
1.3. Application aux modèles intégrés 197

2. Cadre formel d'analyse de la décision 201
2.1. Arbres du problème 201
2.2. L'effet d'irréversibilité 204
2.3. La valeur d'option et de l'information 206

3. La valeur d'option 208
3.1. La Valeur de l'Information 208
3.2. Discussion du signe de la valeur d'option 210
3.3. Analyse quantitative 212

4. Discussion 216
4.1. Résumé des résultats et implications 216
4.2. Deux dimensions supplémentaires: information et préférences 216

CHAPITRE 8. CONCLUSION 221

1. Principaux résultats: Effet d'irréversibilité et précaution 221
1.1. La thèse 221
1.2. Dans un cadre déterministe 222
1.3. En décision séquentielle 222
1.4. En analyse de la décision 223

2. Quelques ouvertures pour les travaux futurs 224
2.1. Vers la prise en compte des hétérogénéités 224
2.2. Directions théoriques et méthodologiques 225
2.3. Conclusion générale 226

BIBLIOGRAPHIE 227

TABLES ET INDEX

Table des Matières 247

Table des Figures 250

Table des Tableaux 252

Table des Encadrés 253

Index 254

Table des Figures

Figure 1.1 : Schéma simplifié de l'effet de serre. 9
Figure 1.2 : Évolution de la température moyenne globale. 10
Figure 1.3 : Évolution des émissions de CO_2 en France, 1960-1996. 11
Figure 1.4 : Stabilisation du CO_2 atmosphérique et variation de température. 12
Figure 1.5 : Fonction d'installation du capital 21
Figure 1.6 : Aspects de l'évaluation intégrée du changement climatique 30
Figure 2.1 : Spectres de rayonnement et absorption atmosphérique. 43
Figure 2.2 : Concentration de CO_2 et température : - 160 000 à nos jours. 44
Figure 2.3 : Evolution globale de la température. 44
Figure 2.4 : Evolution du niveau de la mer généralisé sur tout le globe. 45
Figure 2.5 : Couverture nuageuse et amplitude thermique. 46
Figure 2.6 : Index américain « climat - effet de serre » 46
Figure 2.7 : Concentration de CO_2 sur le dernier millénaire. 47
Figure 2.8 : Evolution locale de la température. 48
Figure 2.9 : Refroidissement dû aux aérosols. 49
Figure 2.10 : Schéma du cycle du carbone 50
Figure 2.11 : Schéma des perturbations d'origine humaine 50
Figure 2.12 : Evolution de la population et de la richesse par régions du monde. 59
Figure 2.13 : Evolution du PIB par habitant par région du monde depuis 1960. 59
Figure 2.14 : Evolution historique de l'intensité énergétique commerciale. 61
Figure 2.15 : Découplage énergie-croissance dans les pays de l'OCDE. 62
Figure 2.16 : Evolutions possibles des parts de différentes sources d'énergie. 64
Figure 2.17 : Consommation mondiale d'énergie primaire par sources, 1860-1994. 64
Figure 2.18 : Evolution de l'intensité énergétique du PIB. 65
Figure 2.19 : Répartition politique des émissions de CO_2 en 1990. 68
Figure 2.20 : Croissance des populations et des émissions. 68
Figure 2.21 : Par pays, Emissions=population*PIB per capita*intensité en CO_2 du PIB 69
Figure 2.22 : Convergence des émissions par tête (1GtC en 2050 ou 2100) 73
Figure 3.1 : Différents profils d'émissions et de concentrations à long terme. 85
Figure 3.2 : Perte de surplus engendré par la réduction. 88
Figure 3.3 : Coûts de réduction 89
Figure 3.4 : Retombée soufrées dépassant la charge critique en Asie, 2050. 91
Figure 3.5 : Différentes vues sur le coût de réduction des émissions. 92
Figure 3.6 : Réduction dans le temps du coût de réduire les émissions. 96
Figure 4.1 : Structure des modèles intégrés. 105
Figure 4.2 : DICE, Distribution stochastique de l'indice de sévérité. 112
Figure 4.3 : DICE, Impact de l'incertitude sur les niveaux de réduction optimaux. 113
Figure 4.4 : When and where flexibility. 118
Figure 4.5 : Profils d'émission de référence dans CRPS. 120
Figure 4.6 : IMAGE 2, Diagramme schématique. 121
Figure 4.7 : Allure des fenêtres tolérables d'émissions de CO_2. 123
Figure 4.8 : AEEI et progrès technique induit par les prix. 128
Figure 5.1 : Décomposition du coût de réduction. 136
Figure 5.2 : Profils d'émissions de référence, $E^{industrial}$ et $E^{landuse}$. 144
Figure 5.3 : Scénario d'émission de dioxyde de carbone de référence 145
Figure 5.4 : Fonction de réponse atmosphérique utilisée. 146
Figure 5.5 : Résultats de DIAM, cas central (stabilisation en 2050). 155
Figure 5.6 : Résultats de DIAM, stabilisation en 2150 156

Figure 5.7 : DIAM, Sensibilité au taux d'actualisation 158
Figure 5.8 : Le Lièvre et la Tortue. 163
Figure 5.9 : Calcul simplifié de la date butoir. 164
Figure 6.1 : Scénarios WGI et WRE. 166
Figure 6.2 : Émissions de CO_2, scénarios IS92. 170
Figure 6.3 : Chemins de réduction optimaux ‘one shot’ 175
Figure 6.4 : Conséquences d’un délai pour 450 ou 550 ppmv 176
Figure 6.5 : Profils temporels des coûts de réduction 177
Figure 6.6 : Stratégie optimale en décision séquentielle, cas central. 179
Figure 6.7 : Inertie, actualisation et réduction optimale à court terme 180
Figure 6.8 : Diverses stratégies optimales. 181
Figure 6.9 : Janus 181
Figure 6.10 : Emissions optimales avec incertitude 183
Figure 6.11 : Représentations des dommages climatiques, EMF 14 study 187
Figure 6.12 : Fonction de dommage climatique avec et sans seuil. 188
Figure 7.1 : Quatre scénarios de CO_2 pour le XXIe siècle 201
Figure 7.2 : Analyse de la décision WRE ou WGI, calcul des coûts espérés 203
Figure 7.3 : Valeur de l'information. 209
Figure 7.4 : Valeur d'option des réductions agressives à court terme 211
Figure 7.5 : DIAM: Valeur d’option de WGI 215

Table des Tableaux

Tableau 1.1 : Concentration de trois gaz à effet de serre en 1750 et 1992. 8
Tableau 1.2 : Ordre de grandeur de l'effet de serre: Terre, Vénus, Mars 8
Tableau 1.3 : Réserves de carbone 12
Tableau 1.4 : Emissions permises 12
Tableau 1.5 : Incertitude sur l'Évolution des rendements agricoles. 24
Tableau 1.6 : Les irréversibilités dans le changement climatique. 27
Tableau 2.1 : Taille de la population mondiale dans trois scénarios. 56
Tableau 2.2 : Emissions régionales de CO_2 pour le scénario IS92a 70
Tableau 2.3 : Poids du tiers monde et diminution des émissions. 70
Tableau 2.4 : Implications d'une convergence des émissions per capita. 73
Tableau 3.1 : Evénements institutionnels récents sur le changement climatique 78
Tableau 3.2 : Emissions de CO_2 cumulées entre 1990 et 2100 (en GtC) 85
Tableau 3.3 : Emissions mondiales de C et de S en 2050. 91
Tableau 3.4 : Prise de décision : univers stabilisé - univers controversé. 98
Tableau 4.1 : Modèles intégrés et leur environnements de programmation. 107
Tableau 4.2 : Différences modèles Climatiques - modèles Socio-économiques 108
Tableau 4.3 : DICE, paramètres incertains influant le plus sur la sévérité. 112
Tableau 4.4 : Niveau de réduction optimal en 1995 - Kolstad 1994. 114
Tableau 4.5 : YOHE, Coût espéré de stabilisation de la concentration. 116
Tableau 4.6 : CRPS, Meilleure stratégie à court terme. 119
Tableau 4.7 : CRPS, Durées de pénétration du capital non polluant. 120
Tableau 4.8 : IMAGE 2, Couloir de sécurité des émission en 2010. 122
Tableau 5.1 : Exemples de coûts permanents et de coûts d'ajustements. 136
Tableau 5.2 : Valeurs de c_a et c_b pour les valeurs de τ étudiées. 152
Tableau 5.3 : DIAM, résultats, cas central, stabilisation en 2050 155
Tableau 5.4 : DIAM, résultats, stabilisation en 2150 156
Tableau 5.5 : DIAM, sensibilité aux dommages climatiques 159
Tableau 6.1 : Coût de réduction des émissions pour différentes trajectoires. 166
Tableau 6.2 : Caractéristiques des scénarios et stratégies d'émission optimaux 178
Tableau 6.3 : Résultats: coût-bénéfice, dommages stochastiques linéaires 184
Tableau 6.4 : Incertitude 189
Tableau 6.5 : Résultats: coût-bénéfice, dommages stochastiques non linéaires 189
Tableau 7.1 : Coûts espérés et définition de la valeur d'option. 206
Tableau 7.2 : Décision sous controverse et irréversibilités 211
Tableau 7.3 : DIAM: Valeur d'option de WGI. 215

Table des Encadrés

Encadré 1.1 : Flexibilité, irréversibilité absolue et irréversibilité des choix. 14
Encadré 1.2 : Cette vertu appelée flexibilité. 20
Encadré 1.3 : Han Hsin brûle ses vaisseaux 22
Encadré 1.4 : Fiche récapitulative : problématique 28
Encadré 2.1 : Techniques et mesures d'adaptation (GIEC Groupe II) 52
Encadré 3.1 : Extraits de la Convention Climat 79
Encadré 3.2 : Les principes importants de la Convention Climat 80
Encadré 4.1 : Modèle de Pindyck. 106
Encadré 4.2 : De Global 2100 à MERGE 3. 117
Encadré 4.3 : Éléments de structure d'ICLIPS. 124
Encadré 5.1 : Choix de la fonction de réponse atmosphérique 146
Encadré 5.2 : Équations de DIAM en coût-bénéfice déterministe 152
Encadré 5.3 : Paramètres de DIAM en coût-bénéfice déterministe 152
Encadré 6.1 : Équations de DIAM en coût-efficacité stochastique 173
Encadré 6.2 : Équations de DIAM en coût-bénéfice stochastique, coûts linéaires 185
Encadré 7.1 : Fonctions coût de réduction et dommage climatique - DIAM 213

Index

accélération 95; 171
actions conjointes 71
actualisation 175; 214; 221
adaptation 52; 94; 213
AEEI 128; 173
aérosols 39; 49
AGBM 78
agrégation 7; 137
analyse coût-bénéfice 11; 87; 110; 160
analyse coût-efficacité 87; 110
analyse de la décision 87; 193
Annexe I et II 80
anticipation 20
ATL 116
atténuation 52; 94
attribution 54

back-stop technologies 128
bottom-up 93
Byrd-Hagel (résolution du Sénat U.S.) 71

calotte glaciaire 41
capital 27; 60; 119
  inertie 167
  productivité marginale 167
CBA 87
CETA 118; 199
CFC 25
changement climatique 8
  attribution 37
  catastrophes 41
  changement global 8
  détection 23; 37
  effet de serre 43
  irréversibilité 26
  réchauffement global 8; 38
  signal 23; 39
  surprises 169
  température globale 44
  température locale 48
  vitesse 40
circulation thermohaline 23; 41
Cline 93; 143
communication nationale 81; 84
  France 11
concentration 47
  CO2 38; 44
  de 1750 à nos jours 8
  profils WRE/WGI 85
Connecticut (modèle) 115
Convention Climat 77; 79
  article 2 79
  réalisations 81
convergence 71
COP 78
coût
  bien-être 88
  d'ajustement 89; 135; 161
  d'ajustement 21
  dans DIAM 141
  de réduction 12
  délai 176; 182
  négatif 92
  réduction 87
CRPS 119; 199

décision
  analyse 223
  publique 87; 193
  séquentielle 179
  sous controverse 97; 210; 213
décision séquentielle 95; 171; 194; 216
  exemples 22
  GIEC 199
  métaphore du conducteur 172
délai
  avantages 221
  coût 176; 182
Delft (processus de) 121
développement durable 8; 20; 60; 95
  droit 80
DICE 30; 107; 109; 111
double dividende
  économique 92
  environnemental 90
durée caractéristique
  fonction de coût 150
  implicite 26
  irréversibilité 15
  système climatique 191
  systèmes énergétiques 173

effet d'irréversibilité
  définition générale 195
  définition historique 195
  démonstration 204
  valeur de quasi-option 196
El Niño 41; 54
émissions
  1860-1984 144
  1990 par pays 68
  cumul 85
  IS92a 144
  profils IS92 170
  profils WGI et WRE 166
  profils WRE/WGI/IS92a 85
  réduction 137
  répartition actuelle 66
  Safe Corridor 84; 121; 167
  sources 139
  tendances 66
  Tolerable Window 123
  trajectoire 161
  usage des sols 139
énergie
  découplage 62
  France 11
  intensité énergétique 61
  nucléaire 63
  renouvelable 63
  réserves fossiles 11
  substitution entre combustibles 63
équité 66; 67; 110
équivalent certain 193; 194
ERB 173
évaluation intégrée 7; 29
  légitimité 30
  modèle 29; 105; 126
EVFI 201; 206

FCCC 77
flexibilité 15; 20; 195; 216
  perte de 16
  when and where flexibility 118
  when flexibility 165
  where flexibility 84
  where flexibility 71
fonction de coût 92
  diminution dans le temps 96
  durée caractéristique 150
fonction de dommages 125; 185
  non linéarité 222

gaz à effet de serre 7; 38
GES 7
GHG 7
GIEC 77; 81
glaciation 40
Global 2100 117; 173
Goulder 129
GREEN 70; 128
GWP 137

Hammitt 119

IAM 29
ICLIPS 107; 109; 123
IEA 78
IIASA 30; 90; 129
IMAGE 30; 109; 121
impact 10; 11; 51; 83
  dans DIAM 147
  favorable 55
  France 11
  incertitude 24

rendements agricoles 24
sceptiques 54
incertitude 194
climatologie 23
convention EMF 14 182
date de résolution 198
impacts 24
information endogène 25
plafond de stabilisation 175
scénario de référence 169
inertie 15; 161; 175; 214; 221
arbitrage présent-futur 172
capital en place 167
système climatique 147
information 194
amélioration 198
endogène 217
information future
valeur espérée 201; 209
Integrated Assessment Model 29
IPCC 77
irréversibilité
absolue 14
climat 26
controverse 99
conventions 20
des choix 16
économie 19
entropie 18
environnement<>investissement 197
investissement 26
thermodynamique 17

Jorgenson et Wilcoxen 129

Kaya (identité dite de) 56; 69
Kolstad 114
Kyoto 11; 38; 81

lock-in 130
LTA 116

MERGE 71; 107; 110; 116; 118; 128
MIT 111

Nordhaus 93; 112; 199

optimisation 7; 108

PAGE 125
Pindyck (modèle de) 106
population 56; 110
américaine 67
pays en développement 57
principe de 58
projections 56
principe
précaution 80; 94
responsabilité commune mais différenciée 67; 80
progrès technique 19; 61; 65; 95; 167
autonome 141; 221
induit 27; 135; 171; 218
induit (exemples) 126
modélisation 128

QELROS 71

RAINS 30; 90
Rio 78; 94
risque inversé 11; 12

sans regrets 90
simulation 7; 108
SLICE 114
stabilisation 38; 110
550 ppmv 168
date 160
incertitude 175
surprise 25
climat 169
décision publique 169

temps 194
dans les modèles 108
décision prise à 100
thèse
formulation 13
plan 33
top-down 93

Ulph et Ulph 125; 200
usage des sols 53
projections d'émissions 144

valeur d'option 196; 206; 212; 216
signe 210
valeur de quasi-option 196; 216
valeur d'option 19

WEC 78
World3 29
WRE 109; 165; 221

Yohe 115

***

Composé en Times New Roman 12 avec MS-Word 6.0, bibliographie avec LaTeX

Imprimé le Friday 2 April 1999 au CIRED, 1 rue du 11 Novembre, Montrouge, France.

Comment tenir compte de l'irréversibilité dans l'évaluation intégrée du changement climatique ?
Ha-Duong, Thèse de doctorat de l'Ecole des Hautes Etudes en Sciences Sociales, 258 p., 1998.

Résumé : Les politiques énergétiques ne peuvent plus ignorer leurs conséquences sur le climat. Mais il s'agit d'un problème à long terme et encore mal connu scientifiquement. Plusieurs raisons justifient qu'il serait plus économique de reporter de quelques décennies le contrôle des émissions de gaz à effet de serre : l'actualisation, le progrès technique, l'inertie du stock de capital en place et l'irréversibilité des investissements nécessaires à ce contrôle. Mais d'autres arguments, aussi examinés dans cette thèse, incitent à la prudence : l'inertie des systèmes socio-économiques futurs, le progrès technique induit, et l'irréversibilité possible des évolutions climatiques.

Après une présentation des conditions générales du problème du changement climatique au chapitre 2, puis une exposition plus historique des débats au chapitre 3, le chapitre 4 passe en revue un nombre substantiel de modèles intégrés ayant contribué à l'analyse de la question.

Le chapitre 5 expose un modèle intégré sur la réduction optimale des émissions de CO_2, DIAM, pour montrer dans quelle mesure les travaux précédents surestimaient les coûts de réduction à long terme et sous estimaient les coûts d'ajustement. Il apparaît qu'étant donné une date de stabilisation de la concentration atmosphérique de CO_2, une inertie plus élevée implique une trajectoire optimale de concentration plus basse.

Formulant ensuite au chapitre 6 le problème en termes de décision séquentielle, on trouve que l'incertitude actuelle sur le plafond de concentration « sans danger pour le système climatique » justifie une action notable à court terme. Enfin, le chapitre 7 se replace dans le cadre de la théorie de l'effet d'irréversibilité, pour comparer empiriquement l'irréversibilité environnementale avec l'irréversibilité des investissements en calculant une valeur d'option associée un contrôle précoce des émissions de gaz à effet de serre.

Ces travaux ont fait l'objet d'articles dans *Energy Policy*, *Nature* et *Energy Economics*.

Ha-Duong, 1998, How to account for irreversibility in integrated assessment of climate change?

Summary : This Ph. D. thesis in Economics balances discounting, technical progress and the inertia of existing capital stock against uncertainty and the inertia of socio-economic systems to examine the issue of near term limitations of greenhouse gases emissions. After a general overview in chapter 2, and a more historical presentation of the debates in chapter 3, chapter 4 proceeds to review a large number of integrated assessment models.

Chapter 5 introduces a Model on the Dynamics of Inertia and Adaptability of energy systems : DIAM, used to discuss how much previous studies might have overestimated the long term costs of CO_2 limitations and underestimated adjustment costs. It shows that, given a target date for atmospheric CO_2 concentration stabilisation, a higher inertia implies a lower optimal concentration trajectory.

In a sequential decision framework, chapter 6 shows that current uncertainties about which CO_2 concentration ceiling would not present dangerous interference with the climate system justifies precautionary action.

Finally, chapter 7 uses the irreversibility effect theory to define formally situations of 'decision under controversy' and compare the irreversibility of CO_2 accumulation with the irreversibility of investments needed to moderate it. An option value for greenhouse gases emissions limitations is computed.

Discipline : Economie.
Mots Clefs : Changement climatique, Irréversibilité, Coûts d'ajustement, Incertitude, Modèle.
Keywords : Climate change, Irreversibility, Adjustment Costs, Uncertainty, Model.
JEL : D83, H41, Q28, Q48.

CIRED. Centre International de Recherches sur l'Environnement et le Développement.