



Distribution spatiale et temporelle des coûts des politiques publiques de long terme sous incertitudes: théorie et pratique dans le cas de l'effet de serre

Franck Lecocq

► To cite this version:

Franck Lecocq. Distribution spatiale et temporelle des coûts des politiques publiques de long terme sous incertitudes: théorie et pratique dans le cas de l'effet de serre. Planète et Univers [physics]. ENGREF (AgroParisTech), 2000. Français. NNT: . pastel-00000065

HAL Id: pastel-00000065

<https://pastel.hal.science/pastel-00000065>

Submitted on 21 Mar 2011

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.



T H E S E

présentée par

Franck LECOCQ

pour obtenir le grade de

Docteur de l'ENGREF

Spécialité : Sciences de l'Environnement

Sujet :

**Distribution spatiale et temporelle des coûts de
politiques publiques sous incertitudes
théorie et pratique dans le cas de l'effet de serre.**

***à l'Ecole Nationale du Génie Rural, des Eaux et Forêts
Centre de Paris***

devant le jury suivant :

M. Rodolphe DOS SANTOS FERREIRA	Rapporteur
M. Pierre PICARD	Rapporteur
M. Jean-Charles HOURCADE	Directeur de thèse
M. Roger GUESNERIE	Examineur
M. Claude MILLIER	Examineur
M. Jonathan PERSHING	Examineur

A Marie

Remerciements

Loin de l'image d'Epinal du face à face solitaire entre le doctorant et son sujet, cette thèse est avant tout le fruit d'une aventure collective. Les gestes élémentaires comme lire un article ou essayer de faire tourner un modèle restent certes individuels, mais ils ne prennent sens que parce qu'ils ont été précédés d'interpellations au détour d'un couloir, de discussions en séminaire de recherche, de multiples allers-retours de textes rédigés à plusieurs mains ou de longues heures de « ping-pong » intellectuel aussi épuisantes que tardives devant un tableau noir. « Rendements croissants d'information ! », tranchera le théoricien. C'est oublier le caractère captivant, exigeant mais toujours passionnant de l'entreprise. C'est surtout faire l'impasse sur tous ceux dont l'enthousiasme et la motivation font vivre ce drôle de navire qu'est le CIREN.

A tout seigneur, tout honneur. Il me faut tout d'abord remercier le capitaine Jean-Charles Hourcade, dont l'inépuisable énergie et l'incorrigible optimisme sont l'âme de ce laboratoire. Dire qu'il m'a beaucoup apporté serait une litote. J'exagérerais à peine en disant qu'il m'a ré-appris à écrire. Mais je lui suis surtout reconnaissant pour son souci constant de mettre la réflexion économique au service des enjeux réels pour la collectivité. Grâce à lui, je crois avoir mieux compris le sens de l'expression « intérêt collectif ».

Parmi mes amis matelots, je voudrais remercier ici Thierry Le Pesant, mon camarade de bureau et complice, Christophe Defeuilley, patient compagnon de mémorables travaux pratiques d'économie et de gestion, et Daniel Théry pour ses innombrables coups de pouce. Je tiens aussi à tirer un grand coup de chapeau à ceux qui rament dans l'ombre pour assurer la bonne marche de l'équipe ainsi que pour la bonne humeur générale, parmi eux Daniel, mais aussi Naceur Chaabane, Yaël Serfaty, Nadia Soleillant, Danny Tran et Eléonore Tyma.

En ce qui concerne le présent travail, je suis reconnaissant à Philippe Ambrosi, Minh Ha-Duong, Khalil Helioui, Thierry Le Pesant, Benoît Simon, Tarik Tazdaït et Daniel Théry pour avoir bien voulu relire patiemment les différentes versions de ce travail et me faire part de leurs commentaires, critiques et suggestions. Je remercie aussi Danny Tran et Eleonore Tyma pour toute l'aide qu'elles m'ont apportée. Plus largement, ce travail doit à tous ceux qui d'une manière ou d'une autre ont fait vivre le dialogue et l'échange au sein de l'équipe.

Au-delà de l'avenue de la Belle Gabrielle, je voudrais remercier Claude Millier et Laurent Mermet pour avoir participé à un comité de thèse très informel, mais qui m'a donné l'opportunité rare de prendre périodiquement un peu de recul par rapport à mon travail. Je souhaite remercier aussi le Corps des Eaux et Forêts qui m'a autorisé à suivre cette Formation Complémentaire Par la Recherche. A moi maintenant de me montrer digne de cette confiance. Merci enfin à mon épouse ainsi qu'à ma famille et belle-famille pour leur soutien pendant cette thèse parfois envahissante.

Néanmoins, et selon la formule consacrée, les vues exprimées dans cette thèse ne sauraient engager d'autre personne que moi-même, de même que toutes les erreurs ou omissions qui pourraient y subsister.

Sommaire

Remerciements	5
Introduction	9
Première partie : De la balistique au tâtonnement : approche numérique de la décision en matière d'effet de serre	27
Chapitre 1 : Une pure métaphore : un agent et un bien en univers certain	29
Chapitre 2 : Figures logiques de la décision sous incertitude	59
Chapitre 3 : Vers une hiérarchisation des incertitudes pesant sur la décision de court terme	77
Premier Entracte	103
Seconde partie : Les enjeux distributifs des politiques climatiques : vers une réflexion sur le contenu de l'héritage	105
Chapitre 4 : Séparabilité des distributions spatiales et temporelles des coûts d'abattement	107
Chapitre 5 : De la « préférence pure pour le présent » à la préférence pour le non sacrifice du présent	135
Chapitre 6 : De l'équité intergénérationnelle à la nature de l'héritage	165
Second Entracte	191
Troisième Partie : Où la modélisation économique rejoint la réflexion institutionnelle	195
Chapitre 7 : Le Protocole de Kyoto au défi du long terme	197
Chapitre 8 : Négociabilité des règles d'allocation internationale des quotas d'émissions	229
Chapitre 9 : Irréductibilité des incertitudes et modèles de coordination	259
Conclusion	277
Bibliographie	279
Glossaire	295
Table des matières	297
Annexes	301

Introduction

Entre les étés trop secs, les hivers trop doux, les ravages d'El Niño et les tempêtes de Noël, les trois mots « effet de serre » sont en passe de s'imposer subitement au palmarès des expressions les plus employées par les médias nationaux. Si la responsabilité du changement global dans les récents événements climatiques reste encore à démontrer, ces catastrophes n'en demeurent pas moins symptomatiques des risques que l'accumulation de dioxyde de carbone, de méthane et d'autres gaz à effet de serre dans l'atmosphère pourrait faire courir à terme au climat de la planète. Il s'agit certes de risques, car tous les maillons de la chaîne qui relie les émissions d'aujourd'hui aux impacts sur le climat et sur les sociétés de demain restent controversés. Mais deux décennies de recherche sur la question climatique offrent aussi des certitudes. En particulier, la double inertie climatique et économique ne nous permet pas d'attendre tranquillement que toutes les incertitudes soient résolues : nous risquerions en effet de prendre une décision trop tardive.

Rappeler que les impacts du changement climatique restent aujourd'hui très mal estimés ne surprendra personne. Il est de notoriété publique en effet que tant la dynamique d'accumulation des gaz à effet de serre que les réactions du climat à la présence de ces composés, les impacts sur les écosystèmes ou les océans, ou encore les dommages finaux sur les économies font l'objet de controverses particulièrement vives au sein de la communauté scientifique. Moins connu peut-être est le fait que les coûts de réduction des émissions, à long terme comme à court terme, sont eux aussi particulièrement discutés, que ce soit au niveau du potentiel de pénétration des nouvelles technologies que des impacts macroéconomiques que toute politique climatique d'envergure ne manquerait pas d'entraîner. Les deux termes de l'arbitrage entre coûts et bénéfices de la lutte contre l'effet de serre se dérobent ainsi aux yeux du décideur qui doit, selon le mot de Lester Lave (1990), « *décider dans un océan d'incertitudes* ».

L'inertie ne nous permettant pas d'attendre pour en savoir un peu plus, nous sommes bien forcés de prendre une décision dès aujourd'hui. De ce point de vue, le tableau que nous venons de brosser n'est guère encourageant. Il suggère en effet que même les outils traditionnels de l'économie publique normative comme l'analyse coûts avantages seront très difficiles à utiliser dans un contexte aussi incertain. Pour filer la métaphore maritime, tout se passe comme si le capitaine ne disposait que d'une carte très imprécise et qu'il ne parvenait plus à remettre la main sur le compas et le sextant. Se pose donc la question de savoir comment choisir un cap, et quels instruments utiliser pour ce faire. La situation se complique encore si l'on constate que le navire a en fait plusieurs capitaines qui ne sont d'accord ni sur la marche, ni sur la direction à suivre. Il s'ajoute donc un sérieux problème de coordination et d'institutions.

1. Contexte : une mer d'incertitudes ?

Avant d'examiner la question de la décision, il est toutefois nécessaire de revenir en détail sur la nature du problème climatique, et en particulier sur la double incertitude climatique et économique qui pèse sur la décision.

1.1. Les impacts controversés du changement climatique

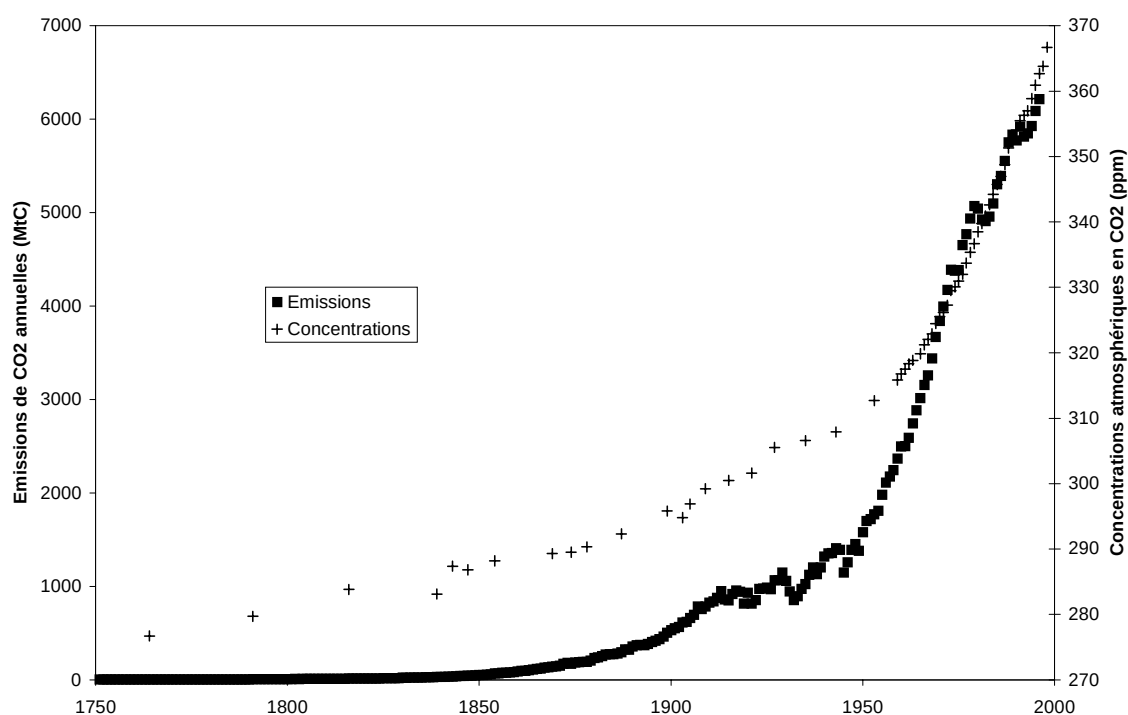
1.1.1. Les bases physiques de l'effet de serre

Rappelons tout d'abord succinctement la nature du mécanisme de l'effet de serre. L'énergie que reçoit notre planète provient du soleil. Une partie de ces rayonnements est renvoyée directement dans l'espace par les différentes couches de l'atmosphère. Le reste, environ les deux tiers de l'énergie

incidente, est absorbé par l'atmosphère, les plantes et le sol. Ce flux d'énergie entrant à la surface terrestre est compensé par des émissions infrarouges du sol vers l'atmosphère. Une partie de ce rayonnement est cependant piégée par des gaz dits gaz à effet de serre présents dans l'atmosphère et contribue ainsi à augmenter de manière significative la température de l'atmosphère. On estime en effet que si cet « effet de serre » naturel n'existait pas, la température moyenne à la surface du globe serait de 33°C inférieure à ce qu'elle est aujourd'hui.

Les principaux gaz responsables de l'effet de serre (notés sous l'abréviation GES dans la suite) sont la vapeur d'eau, le dioxyde de carbone (CO_2), le méthane (CH_4), l'ozone (O_3) et l'oxyde nitreux (N_2O). D'autres gaz ont un aussi un effet moindre mais réel, comme les halocarbones (Chlorofluorocarbones CFC, Hydrochlorofluorocarbones HCFC, Hydrofluorocarbones HFC). La couverture nuageuse et les particules en suspension jouent aussi un rôle important dans le processus.

A l'équilibre, la Terre émet autant d'énergie qu'elle en reçoit. Par contre, si la concentration atmosphérique de l'un des GES augmente, la quantité de rayonnement infrarouge émis dans l'espace diminue alors que le rayonnement solaire incident reste inchangé. En réaction, la température moyenne à la surface du globe augmente, et le système climatique se modifie de telle sorte que l'équilibre des flux énergétiques soit rétabli. Au contraire, si la concentration d'un GES diminue, la température moyenne à la surface du globe tend à se réduire. C'est cet équilibre thermodynamique qui est à l'origine des préoccupations sur la possibilité d'un changement climatique entraîné par les émissions anthropiques de gaz à effet de serre.



Figures 1 : Émissions de CO_2 annuelles entre 1751 et 1996 (millions de tonnes de carbone, en carrés noirs) et concentrations annuelles atmosphériques de CO_2 (parties par millions, petites croix). Source : Marland et al. (1999) pour les émissions de CO_2 , concentrations jusqu'en 1953 obtenues par carottage glaciaire à la station Siple (Neftel et al., 1984), concentrations entre 1953 et 1996 obtenues par prélèvement atmosphérique à la station de Mauna Loa (Keeling et Whorf, 1999).

Nous observons en effet une augmentation très brutale des concentrations en GES dans l'atmosphère depuis le début de l'ère industrielle. La concentration en CO_2 atmosphérique est en effet passée de 280

ppm¹ (parties par million) vers 1750 à 354 ppm en 1990, la concentration en méthane a été multipliée par 2,5 sur la même période et la concentration en nitrates a augmenté de 15 % (IPCC, 1996). L'origine anthropique de ce phénomène pu être discutée, mais il est maintenant établi que le développement massif de l'usage des combustibles fossiles (charbon et plus récemment pétrole), les changements dans l'usage des sols et en particulier la déforestation ainsi que l'intensification de l'agriculture en sont les principales causes (figure 1). La poursuite attendue de ces émissions massives de GES laisse ainsi entrevoir la possibilité d'une modification d'envergure du climat de notre planète.

1.1.2. L'évolution potentielle du climat et des écosystèmes

Les mécanismes d'ajustement naturel du climat aux changements de concentrations atmosphériques en GES sont cependant très complexes, et la compréhension qu'en ont les scientifiques reste partielle. Très grossièrement, nous pouvons dire que pour un scénario d'émissions de GES donné, l'évolution des paramètres climatiques agrégés au niveau mondial est assez bien connue. Le second rapport du Groupe Intergouvernemental d'Etude du Climat² (GIEC) évalue ainsi entre 1,5 et 4,5°C l'augmentation de la température moyenne à la surface du globe qui résulterait d'un doublement de la concentration atmosphérique en CO₂ par rapport à l'ère préindustrielle (IPCC, 1996). A ce même niveau de concentration, la variabilité journalière de la température devrait augmenter en été et diminuer en hiver. De même, les précipitations devraient augmenter au niveau tropical, diminuer dans les zones subtropicales et augmenter légèrement aux latitudes tempérées. La plupart des modèles prévoient une diminution de la circulation thermohaline dans l'Atlantique Nord, ce qui pourrait se traduire par une diminution des températures sur les côtes européennes. Enfin, la hauteur moyenne des océans pourrait varier en 2100 entre 15 et 95 cm pour des concentrations allant de 550 ppm à 850 ppm.

Au-delà de ces indicateurs agrégés, les zones d'ombre se font plus importantes. Les modifications des variabilités des températures, des régimes des précipitations ou de la fréquence des événements climatiques extrêmes restent encore mal connues. En second lieu, les relations entre le changement climatique et une augmentation de la fréquence d'événements de type El Niño demeurent incertaines aux yeux du GIEC. En troisième lieu, dès lors que les données ne sont plus globales mais régionales, les intervalles de confiance deviennent immédiatement très élevés. Le rôle de la couverture nuageuse et des aérosols perturbe en particulier les évaluations. D'un point de vue dynamique, les études n'en sont qu'à leurs balbutiements. La possibilité d'événements catastrophiques non linéaires, comme l'arrêt de la circulation thermohaline dans l'Atlantique Nord est aussi évoquée (Broecker, 1997). Mais la dynamique générale de la réponse du climat en fonction des émissions reste encore *terra incognita*.

Les impacts de ces changements climatiques sur les écosystèmes sont eux aussi entachés de nombreuses incertitudes. Notons d'abord que parler d'impact est abusif dans la mesure où la biosphère constitue un important réservoir de carbone qui échange annuellement avec l'atmosphère de l'ordre de 60 gigatonnes de carbone, soit dix fois les émissions fossiles anthropiques de 1990. Il s'agit donc plutôt de la modification d'un équilibre entre atmosphère et biosphère. Dans le cadre de cette évolution, le GIEC nous indique que les écosystèmes pourraient subir des altérations importantes même pour des hausses de température relativement faibles. Tout dépendra de la vitesse relative des modifications climatiques et de la migration géographique des espèces.

¹ La correspondance entre la concentration atmosphérique et la quantité de carbone stockée dans l'atmosphère est de 1 GtC stockée pour 0,47 ppm (parties par millions de volume).

² Le GIEC est une organisation internationale mise en place conjointement par le Programme des Nations Unies pour l'Environnement et l'Organisation Météorologique Mondiale pour coordonner l'effort international de recherche sur le changement climatique. Le GIEC est divisé en trois groupes consacrés pour le premier à l'étude du climat, pour le second à l'adaptation des écosystèmes et des économies au changement climatique, et pour le troisième à l'évaluation économique des politiques de prévention de ces changements. Cette organisation, qui rassemble l'ensemble des experts internationaux travaillant sur ces questions, produit régulièrement des rapports qui font la synthèse de la connaissance disponible sur l'effet de serre. Le premier a été publié en 1990, le second en 1996 et le troisième, actuellement en cours de révision, devrait être rendu public dans le courant 2000.

Le groupe II du GIEC envisage une augmentation de la désertification dans les zones subtropicales et une extension de la forêt boréale vers le pôle nord. Les couverts végétaux des zones tempérées pourraient eux aussi migrer vers le nord. Au-delà de ces considérations générales, l'incertitude reste très importante, surtout pour évaluer les impacts régionaux. Les évolutions des écosystèmes dépendent en effet à la fois des incertitudes sur la température, les régimes de précipitation et les régimes hydrologiques. La sensibilité à ces incertitudes apparaît très grande. Par exemple, avec les mêmes hypothèses d'émissions et avec le même modèle d'évolution des couverts végétaux, mais avec deux scénarios climatiques différents, White *et al.* (1999) obtiennent soit une Amazonie essentiellement couverte en savanes, soit une Amazonie plutôt sèche et quasi-désertique à l'horizon 2080.

1.1.3. La question des dommages

Parvenu à ce stade, le lecteur aura anticipé que les impacts potentiels de l'effet de serre sur les activités humaines sont aujourd'hui particulièrement difficiles à évaluer. Ils dépendent en effet non seulement de l'évolution du climat et des écosystèmes, mais aussi de la structure future de l'économie et de la nature des technologies qu'elle maîtrise. L'exemple de l'agriculture est particulièrement éclairant : si des progrès techniques importants ont été accomplis en matière de micro irrigation et de développement de variétés peu exigeantes en eau et peu sensibles à la chaleur, l'impact d'une hausse de la température moyenne sera tout autre que si la course aux rendements a privilégié des variétés performantes mais très fragiles. La course de vitesse entre le changement climatique et l'adaptation joue ici un rôle clé. Et la sensibilité à ce paramètre apparaît particulièrement élevée : Tol (1999a) estime ainsi qu'une augmentation de 2,5°C de la température moyenne à l'horizon 2100 entraînerait pour l'agriculture américaine une perte équivalente à 0,25% du PIB à cette date sans adaptation, contre un gain équivalent à 1% du PIB avec adaptation.

D'un point de vue quantitatif, la littérature sur les impacts du changement climatique (Pearce *et al.*, 1996, Tol et Fankhauser, 1998, Tol, 1999a et b) permet néanmoins d'identifier les principaux domaines pour lesquels l'effet de serre pourrait entraîner des tensions, et ce quelle que soit la trajectoire économique effectivement suivie :

- Au niveau global tout d'abord, l'alimentation apparaît comme le secteur le plus exposé avec des tensions régionales et éventuellement mondiales. L'eau est un second facteur de risque très important, en particulier dans les régions déjà en situation de pénurie, surtout si celles-ci voient leur demande augmenter du fait de la croissance économique et/ou d'une forte croissance démographique. Mis ensemble, ces deux éléments constituent un couple potentiellement explosif car ils touchent les besoins vitaux des êtres humains. Si le progrès technique ou la croissance économique (*via* les importations) ne sont pas suffisants pour réduire les tensions régionales, des risques migratoires ne sont pas à exclure.
- Au niveau régional ensuite, la montée des eaux représente un risque important : risque de submersion de certaines îles, en particulier dans l'Océan Pacifique, ou risque d'augmentation de la fréquence des inondations dans les zones côtières. Nicholls *et al.* (1999) estiment que les dangers les plus importants se situent en Asie du Sud et du Sud-Est ainsi que, mais dans une proportion moindre, sur les côtes africaines. Certaines régions devraient aussi connaître une modification de la demande énergétique liée aux changements de température. Cette seconde série de problèmes apparaît *a priori* moins susceptible d'entraîner des tensions importantes à l'échelle mondiale, mais sous réserve d'inventaire précis.
- Il subsiste de nombreuses conséquences potentielles du changement climatique dont les dommages sur les sociétés restent nettement plus difficiles à évaluer : les risques sanitaires, les événements extrêmes, et les pertes de biodiversité en sont trois exemples parmi les plus importants. En effet, tant l'occurrence physique de ces impacts que leurs conséquences économiques sont particulièrement difficiles à évaluer. Ces dernières dépendent en effet fortement de nos anticipations sur l'évolution générale de l'économie dans le futur.

- A ces impacts « objectifs » dont l'accumulation locale peut conduire à des tensions géopolitiques globales, il convient d'ajouter les risques de brusques modifications de la manière dont le changement climatique est perçu par les opinions publiques. Les controverses environnementales récentes, des pluies acides à la vache folle, soulignent les dangers de phases de crise pendant lesquelles la perception du danger augmente brutalement et engendre des coûts particulièrement élevés (Roqueplo, 1990).

Paradoxalement, la fourchette des chiffrages monétaires des impacts présentée dans le second rapport du GIEC (Pearce *et al.*, 1996) apparaît singulièrement étroite³. Pour les USA, une hausse de la température moyenne globale de 2,5°C à l'horizon 2100 est ainsi supposée coûter entre 1% et 1,5% du PIB dans les quatre études de Nordhaus (1991), Cline (1992), Tol (1995) et Fankhauser (1995). Les estimations de ces deux derniers auteurs pour le monde entier s'avèrent aussi relativement proches, à 1,9% du produit mondial brut pour Tol contre 1,4% pour Fankhauser. Il serait cependant particulièrement hâtif de conclure de ces chiffres qu'au final les incertitudes se compensent. Ces données nous semblent au contraire refléter le petit nombre de tentatives d'évaluation des impacts. En outre, les données régionales sous-jacentes à ces études sont très variables. Certaines régions se voient même gratifiées d'impacts positifs : Tol (1999a) obtient ainsi un gain de près de 3,4% du PIB pour les USA avec une hausse de température limitée à 1°C en 2100. Il reste donc beaucoup de chemin à parcourir :

« A lot needs to be done before one can place any confidence in the estimates, and base rational emission reduction policies on them. Firstly, the underlying studies need to improve in quality, increase in number, and extend to other impact categories. Secondly, the static assessment here has to be made dynamic, including both other climate changes and altered socio-economic circumstances. Thirdly, the underlying studies have to be made consistent with regards to scenarios and assumptions about adaptation. » (Tol, 1999a, p.21).

1.2. Les controverses sur les coûts de réduction des émissions de GES

Venons-en maintenant à l'autre versant du problème climatique : les politiques de lutte contre l'effet de serre. De manière très générale, les émissions de GES se présentent comme des sous-produits d'une large gamme d'activités économiques. Réduire ces émissions (nous emploierons indifféremment l'expression « abattre les émissions » dans la suite) suppose donc soit de trouver le moyen d'obtenir le même bien ou service avec un niveau d'émission moindre, soit de diminuer le volume de l'activité concernée⁴.

Dans les deux cas se pose un problème aigu d'observabilité : pour juger de l'efficacité d'une politique donnée en matière d'effet de serre, il faut en effet disposer d'informations tant sur les volumes d'émissions « évités » que sur les coûts de mise en œuvre de la politique considérée. Or cette information n'est disponible que pour très peu d'activités économiques. En réalité, seules les émissions de CO₂ d'origine fossile apparaissent aujourd'hui suffisamment documentées pour qu'il soit possible d'y produire des courbes de coûts de réduction des émissions relativement fiables à un niveau agrégé, national ou mondial (Hourcade *et al.*, 1996c). Même si de plus en plus d'études intègrent maintenant des stratégies d'abattement mixtes (Gielen et Kram, 1998, Reilly *et al.*, 1999, Grubler *et al.*, 1998), ni les émissions de CO₂ non fossiles, ni les émissions des autres GES ne bénéficient d'un appareil statistique et méthodologique comparable à celui mis en place autour du secteur stratégique de l'énergie.

³ Nous aborderons dans le premier chapitre la difficile question du chiffrage monétaire des impacts non médiatisés par le marché.

⁴ Ou bien d'accroître la capture de carbone par les écosystèmes *via* des plantations ou des modifications d'itinéraires techniques agricoles. Ces mesures sont les seules qui ne correspondent pas à une réduction des émissions à la source.

Pour illustrer cette asymétrie, examinons le cas émissions de CO₂ liées aux changements dans l'usage des sols, et en particulier à la déforestation, qui représentaient en 1990 un cinquième des émissions totales de CO₂ d'origine anthropique, et constituent pour certains pays comme le Brésil la principale source de carbone.

- En premier lieu, la mesure des quantités de carbone qui seraient « capturées » par des politiques visant à ralentir la déforestation, à reconverter des terres agricoles en forêts, ou à modifier les pratiques agricoles reste très difficile à effectuer (Mortier, 1995, Brown, 1996, Brown *et al.*, 1996). Nous disposons certes de chiffres correspondant à des expériences locales conduites sous serre, mais leur extrapolation à grande échelle reste très controversée, en particulier pour les écosystèmes forestiers tropicaux (Locatelli, 1996).
- En second lieu, les coûts de telles mesures sont difficiles à évaluer. Si les coûts techniques directs restent assez facilement accessibles, le coût d'opportunité lié au gel de la terre pour un usage forestier dépend de la dynamique globale d'occupation des sols, elle-même liée à la démographie, aux politiques d'aménagement du territoire et à des considérations stratégiques dont l'articulation est spécifique à chaque pays, voire à chaque région (Repetto et Gillis, 1988, Repetto, 1993, Richards, 1995, Sedjo *et al.*, 1995 et 1998). Leur évaluation demande donc un travail spécifique qui n'existe à notre connaissance que pour des cas très particuliers.

De ce fait, et malgré l'importance que peuvent avoir localement les gaz autres que le CO₂⁵ ou les émissions de carbone non fossiles⁶, nous décidons de nous limiter dans cette thèse aux seules émissions de CO₂ fossiles pour lesquelles nous disposons de points de repère assez solides. La qualité des données n'est heureusement pas le seul argument qui plaide pour que soit portée une attention particulière à ces émissions. Le CO₂ représente en effet aujourd'hui 55% de la contribution anthropique au changement climatique⁷ (IPCC, 1994). En dynamique, la tendance est à l'augmentation de cette proportion. Les émissions de CO₂ fossiles sont en effet issues de la production d'énergie, que ce soit de manière directe sous la forme de production de chaleur (chauffage au fuel ou au gaz des bâtiments) ou d'énergie motrice (moteurs à explosion ou réacteurs d'avions), ou indirecte avec la production d'électricité (centrales électriques au charbon, au fuel ou au gaz). Or la consommation d'énergie mondiale est susceptible d'augmenter de manière très importante dans les prochaines années⁸. Ceci dit, et au-delà du présent travail, l'extension de l'analyse au CO₂ non fossile et aux autres GES constitue aujourd'hui un enjeu majeur pour la recherche.

1.2.1. Les coûts d'abattement : une notion non triviale

Intéressons-nous donc maintenant aux coûts de réduction des émissions de CO₂ fossiles. La notion de « coûts » peut s'avérer dangereusement familière. Il est en effet facile d'assimiler le coût d'une politique climatique au prix d'un bien ou d'un service de la vie courante. Or dès lors que nous nous

⁵ Gielen et Kram (1998) estiment par exemple que les gaz autres que le CO₂ pourraient contribuer pour 25% aux objectifs de réduction des émissions de l'Union Européenne pour 2010. Reilly *et al.* (1999) évaluent de même à 22% le gain que l'ensemble de l'annexe I pourrait réaliser en incluant les gaz autres que le CO₂ pour satisfaire les objectifs de Kyoto.

⁶ Ces mesures présentent une importance capitale pour les pays d'Afrique, qui ne disposent pas de potentiels de réduction des émissions fossiles importants pour attirer des capitaux internationaux. De manière plus anecdotique, mais néanmoins importante sur le plan médiatique, les mesures de replantations forestières présentent un intérêt de démonstration certain (« Peugeot va planter 10 millions d'arbres au Brésil », *Le Monde* daté du 11/12 octobre 1998, page 1, « Toyota plants 'green' trees to curb gases », *UK News*, 11 août 1998, consulté sur www.planet-britain.org/globaluk/news/glo_0898_12.htm le 17 août 1998).

⁷ Pour quantifier les effets des différentes émissions sur l'effet de serre, les spécialistes du climat ont introduit la notion de forçage radiatif, qui désigne toute modification de la quantité de radiations entrant dans l'atmosphère, que cette modification provienne d'un changement d'intensité du rayonnement solaire ou, dans le cas qui nous occupe, d'un changement de la quantité de rayonnement infrarouge piégé par effet de serre. Cette notion est donc relative à un état d'équilibre, supposé ici être celui de l'ère préindustrielle. L'IPCC (1996) évalue que le CO₂ représente 63% du forçage radiatif direct lié aux émissions anthropiques de GES depuis l'ère préindustrielle.

⁸ Nous reviendrons en détail au chapitre 7 sur les principaux scénarios de référence à long terme.

intéressons à des objets aussi complexes que le politiques climatiques, cette notion devient plus difficile à saisir. Il convient tout d'abord de rappeler que ce que nous appelons « coût » mesure toujours une différence, augmentation d'une facture libellée en dollars ou diminution du PIB, par rapport à une situation de référence. Ce point trivial en apparence est souvent masqué dans le débat. Il revêt pourtant une importance capitale dès lors que nous nous intéressons au moyen et au long terme : la hiérarchisation des politiques possibles à moyen terme peut en effet se révéler dépendante du scénario de référence retenu à cet horizon. Nous laissons pour le moment cette question de côté, mais nous y reviendrons abondamment dans la troisième partie de cette thèse.

Nous avons jusqu'à présent parlé de coût en général, sans autre précision. Or il est clair que ce mot recouvre des grandeurs dont les statuts et les modes de calcul sont très différents : le coût pour l'entrepreneur n'est pas le même que celui pour les comptes de la Nation. Dans le second rapport du GIEC, Hourcade *et al.* (1996c) en proposent une typologie en quatre niveaux allant du plus micro au plus macroéconomique :

- Coûts directs des mesures techniques. Il s'agit ici des coûts microéconomiques tels qu'ils peuvent être appréhendés par un entrepreneur : par exemple coût du remplacement d'une centrale au gaz par une centrale au charbon, ou coûts d'investissement et d'exploitation d'une centrale solaire. Les bases de données technico économiques du type IKARUS en Allemagne (Stein et Wagner, 1999) fournissent l'essentiel des informations sur ce premier niveau.
- Coûts économiques sectoriels. Ils traduisent l'impact des mesures techniques sur la fonction de production d'un secteur tout entier. Le renchérissement des prix de l'énergie lié à une politique visant l'ensemble des producteurs d'électricité d'un pays donné constitue un exemple typique d'une évaluation à ce second niveau (Holtmark, 1998). Ces évaluations s'appuient sur des modèles sectoriels détaillés sur le plan technologique comme MARKAL (Loulou *et al.*, 1997) ou PRIMES (Capros, 1998).
- Coûts macroéconomiques. L'évaluation des coûts des mesures climatiques sur l'ensemble de l'économie, et en particulier sur le PIB⁹ s'appuie principalement sur des modèles économétriques ou sur des modèles d'équilibre général calculable comme par exemple G-Cubed (Mc Kibbin *et al.*, 1998), SGM (Edmonds *et al.*, 1991, 1997, Fischer-Vanden *et al.*, 1993) ou GREEN (Burniaux *et al.*, 1992) qui permettent de prendre en compte et de synthétiser l'ensemble des interactions entre les différents secteurs de l'économie.
- Coûts en bien-être. Les coûts macroéconomiques ne représentent cependant qu'une partie des conséquences des politiques climatiques sur les agents d'une économie. Les effets non médiatisés par le marché, comme par exemple des bénéfices environnementaux secondaires, ou les effets redistributifs entre catégories de revenus sont très mal pris en compte dans le calcul du PIB. L'analyse en termes de bien-être permet de les intégrer, mais requiert par contre la définition d'une fonction de bien-être collective qui est en général difficile à construire.

1.2.2. ... Et trois sources d'incertitudes

Cette typologie nous permet de mieux appréhender les incertitudes qui pèsent sur les coûts d'abattement. Celles-ci sont essentiellement de trois ordres : incertitudes sur les données, controverses méthodologiques et anticipations des évolutions futures. Les incertitudes sur les données tout d'abord proviennent à la fois des limites des appareils statistiques et de la complexité des phénomènes étudiés. Ces deux mécanismes sont exacerbés par le fait que nous avons peu de recul sur les coûts de politiques visant à réduire de manière très importante les émissions de CO₂, en particulier dès lors qu'elles ne

⁹ Il ne s'agit pas nécessairement du seul indicateur pertinent pour évaluer les politiques climatiques. Les conséquences sur l'emploi, sur la balance commerciale, sur l'industrie nationale ou sur l'innovation technique constituent autant d'autres paramètres dont le décideur public pourra tenir compte (Markandya *et al.*, 1998). Nous reviendrons au chapitre 6 sur l'examen plus détaillé du contenu du legs.

concernent pas uniquement le secteur énergétique¹⁰. Plus nous montons en agrégation, plus ces incertitudes sont importantes, dans la mesure où les mécanismes en jeu sont de plus en plus nombreux, complexes et mal connus. Pour donner un exemple, la mise en place d'une politique climatique à l'échelle des pays développés pourrait avoir des effets induits sur les prix de l'énergie, donc sur la compétitivité relative des industries fortes consommatrices d'énergie du Sud et du Nord. L'évaluation de cet effet de substitution, et de ses conséquences en termes d'emploi et de délocalisation requiert une information dont nous ne disposons qu'en partie (Manne, 1999, Becker, 1999).

Dans ce contexte, la méthodologie permettant d'apprécier les coûts non directement observables devient un élément critique du jeu. La controverse entre l'analyse technico-économique partant des données techniques microéconomiques pour évaluer les coûts par agrégation (approche « *bottom-up* ») et les modèles fondés sur les grandeurs macroéconomiques et leur inscription dans un cadre d'équilibre général (approche « *top-down* ») est ici incontournable, dans la mesure où ces deux approches aboutissent à des résultats différents¹¹. Nous consacrons ci-dessous une section spécifique à l'origine de ces différences. Mais nous rencontrons aussi des problèmes méthodologiques importants dans le passage des coûts macroéconomiques aux coûts en bien-être. Sans nous étendre ici sur une discussion qui occupera une place importante au chapitre 4, notons simplement que la difficulté provient du fait que l'évaluation des coûts en bien-être dépend d'hypothèses pour partie normatives sur la forme des fonctions d'utilité des agents et sur les poids relatifs de chacun d'entre eux dans la fonction de bien-être collective.

Terminons par les incertitudes sur les anticipations des coûts futurs. L'évaluation de politiques climatiques à moyen terme nécessite de formuler des hypothèses quant à la disponibilité et aux coûts futurs des différentes technologies moins émettrices en carbone. La date à laquelle une technologie ultime non émettrice (« *backstop technology* » en anglais) sera compétitive en constitue un exemple typique. Si cette date est supposée suffisamment rapprochée, alors toute politique climatique de réduction des émissions coûteuse aujourd'hui est inutile, puisqu'elle sera avantageusement remplacée par un effort important demain (Wigley *et al.*, 1996). Nous retrouvons ici sous une autre forme l'importance du scénario de référence pour l'estimation des coûts d'abattement¹². En outre, les déterminants du progrès technique futur posent problème. Si la représentation d'un progrès technique autonome « tombant du ciel » a l'avantage de la simplicité, le postulat implicite selon lequel l'efficacité de la recherche et développement et la pénétration des technologies propres seraient indépendantes des efforts de réduction des émissions effectivement entrepris est en contradiction avec la réalité économique. Les notions d'apprentissage, les rendements croissants d'information ou les externalités positives de réseau (Foray, 1989) constituent autant d'arguments pour introduire dans les modèles une représentation du progrès technique induit. Nous reviendrons sur cette discussion au chapitre 6.

Du point de vue numérique, l'ensemble de ces incertitudes aboutissent à des marges d'incertitudes considérables selon les modèles. Dans le résumé de leur revue des études sur les coûts d'abattement pour le second rapport du GIEC, Hourcade *et al.* (1996a) se refusent ainsi à donner des résultats quantitatifs, en indiquant que : « *Estimates of the cost of greenhouse gas emission reduction are sensitive to assumptions about appropriate model structure, demographic and economic growth, the cost and availability of both demand-side and supply-side energy options, the desired level and timing*

¹⁰ Ce dernier argument doit toutefois être relativisé : malgré 20 ans d'expérience en la matière, il n'est pas évident que nous ayons aujourd'hui en France une idée très précise des coûts macroéconomiques des politiques de lutte contre le chômage.

¹¹ Parmi les grands modèles économiques consacrés au changement climatique, nous pouvons citer dans la première catégorie « *bottom-up* » des modèles comme MARKAL (Loulou *et al.*, 1997), POLES (Criqui, 1996, Criqui *et al.*, 1999) ou PRIMES (Capros, 1998) ; et dans la catégorie « *top down* » des approches comme G-Cubed (Mc Kibbin *et al.*, 1998), ABARE (Kennedy *et al.*, 1997) ou GREEN (Burniaux *et al.*, 1992).

¹² En pratique, nous constatons cependant que la cohérence entre la trajectoire économique de référence (c'est-à-dire sans politique climatique particulière) et les hypothèses sur les coûts d'abattement est rarement vérifiée. Le lecteur constatera d'ailleurs que par manque de données, la présente thèse présente le même défaut : il s'agit là d'un enjeu de recherche très important pour la suite.

of abatement, and the choice of policy instruments. Different assumptions have led to a wide range of emission reduction cost estimates. » (p.301). Pour donner un ordre d'idée de ces incertitudes, notons par exemple que les évaluations du coût marginal de mise en œuvre du protocole de Kyoto en 2010 au sein des pays de l'annexe B avec un marché de permis d'émissions négociables (cf. infra) rassemblées par l'OCDE en 1998 varient entre 20\$ et 123\$ (\$1995) par tonne de carbone (Van der Mensbrugghe, 1998). Or nous nous trouvons ici dans une situation favorable, puisque l'horizon considéré est relativement proche, que seuls les pays développés sont pris en compte, et que la présence du marché de permis d'émissions négociables tend à limiter l'impact de l'incertitude sur les coûts d'abattement nationaux.

1.2.3. Potentiels sans regrets et double dividende

Nous avons défini les politiques climatiques comme une contrainte sur les émissions de CO₂. Avec les coûts macroéconomiques, nous avons néanmoins implicitement admis l'idée que la mise en œuvre de ces mesures pouvait entraîner des effets positifs dont les bénéfices pourraient être décomptés des coûts bruts de la politique climatique. Nous terminons cette section sur les coûts en faisant un zoom sur trois de ces effets positifs : les potentiels techniques sans regrets, le double dividende économique et les autres bénéfices écologiques. Nous justifions ce surcroît d'attention par le fait que ces trois mécanismes illustrent en réalité l'importance du débat sur la nature de la trajectoire économique de référence pour l'évaluation des coûts d'abattement.

Un potentiel sans regret, ou potentiel à coût négatif, se définit comme une technologie qu'il est possible d'adopter et dont les coûts sont plus faibles que ceux des technologies aujourd'hui mises en œuvre. L'existence de tels potentiels est controversée. Le nœud de ce débat est de savoir si l'économie réelle réalise pleinement ou non l'ensemble de son potentiel de production théorique. Si nous nous situons sur la frontière de production théorique ou potentielle, alors nous ne pouvons réduire les émissions de gaz à effet de serre sans diminuer du même coût notre niveau de consommation. Si nous sommes par contre situés en deçà de cette frontière, il est alors possible d'envisager des politiques bénéfiques à la fois pour l'environnement et pour la croissance. Si de tels potentiels existent, il faut cependant expliquer pourquoi ils n'ont pas déjà été utilisés. Admettre leur existence suppose en fait que les marchés et les institutions n'amènent pas spontanément à la frontière de production potentielle du fait soit d'imperfections de marché (asymétries d'information, concurrence imparfaite, etc.) et/ou par le fonctionnement des institutions (défauts de régulation, poids du système fiscal, mauvaise définition des droits de propriété, etc.) (Hourcade *et al.*, 1996c). En ce sens, le débat porte tout autant sur la nature de la trajectoire de référence que sur les coûts directs des politiques étudiées.

Outre ses conséquences directes sur l'effet de serre, une politique climatique peut générer un second dividende économique qui dépend de la nature des instruments économiques mobilisés. Dans le cas de la mise en place d'une fiscalité spécifique, par exemple une taxe sur l'énergie, le produit de la taxe peut être recyclé en réduisant la fiscalité dans un autre secteur. Si la fiscalité dans cet autre domaine est supposée plus distorsive¹³ que dans le domaine énergétique, alors le recyclage « intelligent » permet de réduire la distorsion « globale » et réduit d'autant le coût net de la politique climatique. Dans le cas contraire, il peut tout aussi bien aggraver les distorsions et ainsi engendrer une perte (Bovenberg et Van der Mooij, 1994, Goulder, 1995). L'évaluation du double-dividende suppose donc une analyse du système fiscal préexistant et des distorsions plus ou moins importantes qu'il induit sur le fonctionnement de l'activité économique. Cette analyse requiert aussi de comprendre l'impact dynamique de la fiscalité sur l'activité économique (Hourcade *et al.*, 1998).

La littérature comptabilise enfin un troisième dividende, parfois appelé double-dividende écologique, qui correspond au fait que les politiques de réduction des émissions de CO₂ peuvent engendrer des bénéfices environnementaux dans d'autres domaines. La littérature sur ces « *ancillary benefits* » reste

¹³ Une taxe est distorsive dès lors que sa présence modifie l'équilibre offre-demande qui s'établirait spontanément en son absence. En statique, l'importance de la distorsion dépend du niveau de la taxe ainsi que des pentes respectives des courbes d'offre et de demande.

encore limitée. Deux éléments ont néanmoins été mis en avant. Le premier concerne la réduction de la pollution dans les villes : des politiques d'amélioration de l'efficacité énergétique des véhicules permettraient en effet de limiter les émissions de CO₂, mais surtout de freiner la progression de la pollution. Pour Mexico ou les grandes cités d'Asie du Sud-Est, il s'agit d'un enjeu de santé publique décisif aujourd'hui. Le second élément qui a fait l'objet d'analyses poussées est le lien entre émissions de CO₂ et émissions de SO₂. Grubler *et al.* (1998) démontrent ainsi qu'une réduction de 40% des émissions de CO₂ en Asie pourrait entraîner une réduction de 65% des émissions de SO₂. Nous retrouvons encore une fois la question de la trajectoire économique de référence : prendre en compte le double dividende écologique dans le calcul des coûts des politiques climatiques revient en effet à supposer que des politiques visant à limiter les émissions de SO₂ ne seront pas mises en œuvre directement dans le futur.

1.3. La négociation climat

Ces éléments de contexte ne sauraient être complets sans que nous évoquions succinctement l'historique de la négociation climat. Nous verrons en effet que cette historique conditionne largement les conditions de la décision aujourd'hui. Si elle est connue sur le plan théorique depuis la fin du XIX^e siècle (Arrhenius, 1896), la question du changement climatique n'a commencé à émerger en tant que problème qu'au milieu des années 70. Les météorologues sont les premiers à se saisir de ce dossier. Ils diffusent *via* l'Organisation Mondiale de la Météorologie et le Programme des Nations Unies pour l'Environnement les premières analyses publiques très alarmistes. Dans un contexte politique marqué à la fin des années 80 par une montée des préoccupations environnementales et le souvenir récent de deux épisodes de sécheresse consécutifs très importants, l'administration américaine voit dans le changement climatique une formidable occasion de faire passer dans l'opinion la nécessité d'une fiscalité susceptible de mieux contrôler la demande énergétique et de réduire ainsi la dépendance stratégique du pays vis-à-vis des pays du Golfe¹⁴ (Hourcade, 1999).

Dans ce contexte favorable, le Groupement Intergouvernemental d'Etude du Climat (GIEC)¹⁵ est créé en 1988. D'autre part, une négociation internationale sur le climat s'engage sous l'égide des Nations Unies et aboutit, malgré la complexité et la nouveauté du sujet, à la signature de la Convention Cadre sur le Changement Climatique lors du Sommet de Rio en 1992. Nous retiendrons ici deux éléments de cette Convention qui se révéleront très importants pour la suite :

- En premier lieu, la Convention introduit un objectif climatique : « *L'objectif ultime de la présente Convention [...] est de stabiliser [...] les concentrations de gaz à effet de serre dans l'atmosphère à un niveau qui empêche toute perturbation anthropique dangereuse du système climatique. Il conviendra d'atteindre ce niveau dans un délai suffisant pour que les écosystèmes puissent s'adapter naturellement aux changements climatiques, que la production alimentaire ne soit pas menacée, et que le développement économique puisse se poursuivre de manière durable.* » (UN, 1992, article 2). Le point important est que cet objectif est formulé en termes de niveau limite d'émissions, l'efficacité économique étant convoquée dans un deuxième temps pour la réalisation de cet objectif.
- En second lieu, le principe d'une différenciation entre les pays est inscrite dans la Convention. Comme le stipule l'article 4.2 (a) « *Les pays développés Parties et les autres Parties figurant à l'annexe I [...] adoptent des mesures voulues pour atténuer les changements climatiques en limitant leurs émissions anthropiques de gaz à effet de serre [...]* ». L'objectif indicatif proposé d'une stabilisation en 2000 des émissions à leurs niveaux de 1990 ne sera pas atteint, mais le rôle moteur des pays développés en matière de réductions des émissions de gaz à effet de serre est

¹⁴ C'est en particulier l'essence du discours prononcé par le secrétaire d'état américain à l'énergie, M. Schlesinger à la Conférence Mondiale de l'Energie en 1989.

¹⁵ Voir note 2.

acquis sur le principe de la « *Responsabilité commune mais différenciée* » introduit dans le Préambule de la Convention^{16,17}.

La Convention offre ainsi une réponse en apparence neutre à la question de la mise en place d'une taxe carbone : l'Union Européenne y était favorable, alors que l'administration Bush et les milieux industriels y étaient opposés. Mais le projet européen de création d'une taxe carbone interne à l'Union ayant échoué trois semaines avant Rio avec le retrait de la France, la Convention ne se prononce pas sur la nature des instruments à utiliser pour mettre en œuvre les objectifs de réduction des émissions. Elle formule cependant ses objectifs non contraignants en termes de quantité, ce qui mène plus naturellement à un système de permis d'émissions négociables qu'à un système de taxes coordonnées (Godard et Hourcade, 1991).

Entre 1992 et 1995, le contexte s'assombrit. Aux Etats-Unis, le projet de taxe sur l'énergie de l'administration Clinton échoue en 1994, dans un contexte politique nettement moins favorable à l'environnement en général, et au changement climatique en particulier (Grubb *et al.*, 1999). En parallèle, le discours du GIEC, alors en phase de préparation de son second rapport, se fait moins alarmiste (Théry, 1997). Dans cette atmosphère moins enthousiaste qu'en 1992, la première Conférence des Parties¹⁸ de Berlin (1995) reconnaît l'objectif de stabilisation en 2000 « inadéquat » mais décide de commencer à négocier des objectifs quantitatifs de réduction des émissions au-delà de 2005, avec la troisième COP à Kyoto pour date butoir. Cette décision est connue sous le nom de Mandat de Berlin. Ce Mandat concrétise ainsi officiellement la prééminence de l'approche par les quantités. Or, comme nous l'avons déjà entrevu plus haut, une telle approche mène naturellement à un marché de permis d'émissions négociables comme il en existe déjà un aux Etats-Unis pour le SO₂ et relègue les « politiques et mesures » pourtant prônées en même temps par les pays européens au second plan. Ce glissement sera complètement explicite à COP-2 (Genève, 1996), lorsque les USA se déclareront en faveur de quotas de réduction des émissions contraignants mais accompagnés d'un système de permis d'émissions négociables.

La Conférence de Kyoto (1997) constitue l'aboutissement de ce long processus de négociation internationale. Le principal résultat de cette négociation est un accord sur des objectifs quantitatifs contraignants de réduction des émissions de gaz à effet de serre pour la période 2008-2012 pour l'ensemble des pays développés regroupés au sein de l'annexe B¹⁹. Ces engagements sont reproduits dans le tableau 1 ci-dessous. Ces objectifs de réduction des émissions doivent être réalisés sur un panier de six gaz à effet de serre²⁰. Notons que le principe de différenciation s'est imposé sur le tard, et a conduit à des négociations très rapides : la distribution finalement adoptée ne résulte ainsi d'aucune « règle » claire (Grubb *et al.*, 1999).

¹⁶ L'annexe I comprend Allemagne, Australie, Autriche, Belgique, Biélorussie, Bulgarie, Canada, Communauté Européenne, Croatie, Danemark, Espagne, Estonie, Etats-Unis d'Amérique, Finlande, France, Grèce, Hongrie, Irlande, Islande, Italie, Japon, Lettonie, Liechtenstein, Lituanie, Luxembourg, Monaco, Norvège, Nouvelle Zélande, Pays-Bas, Pologne, Portugal, République Tchèque, Roumanie, Royaume Uni et Irlande du Nord, Russie, Slovaquie, Slovénie, Suède, Suisse, Turquie, Ukraine.

L'annexe I comprend ainsi la plupart des pays de l'OCDE à l'exception de la Corée et du Mexique, plus la Communauté Européenne, les pays en transition non membres de l'OCDE (Bulgarie, Estonie, Lettonie, Lituanie, Roumanie, Russie, Slovaquie, Slovénie, Ukraine) ainsi que le Lichtenstein et Monaco.

¹⁷ Notons que la Convention charge le Fonds pour l'Environnement Mondial de fournir de manière transitoire un outil financier à même d'appuyer des projets de réduction des émissions dans le Sud (articles 11 et 21.3).

¹⁸ La Convention Cadre des Nations Unies pour le Changement Climatique (CCUNCC dans la suite) introduit le principe d'une réunion annuelle de la Conférence des Parties (COP). La première de ces réunions est programmée au plus un an après l'entrée en vigueur de la Convention, entrée en vigueur qui intervient finalement en 1994.

¹⁹ L'annexe B comprend tous les pays de l'annexe I (cf. note 16) sauf la Turquie et la Biélorussie.

²⁰ Outre le dioxyde de carbone (CO₂) déjà cité, le Protocole inclut le méthane (CH₄), l'oxyde nitreux (N₂O), les hydrofluorocarbones (HFC), les hydrocarbures perfluorés (PFC) et l'hexafluorure de soufre (SF₆).

Allemagne	92	Finlande	92	Norvège	101
Australie	108	France	92	Nouvelle-Zélande	100
Autriche	92	Grèce	92	Pays-Bas	92
Belgique	92	Hongrie*	94	Pologne*	94
Bulgarie*	92	Irlande	92	Portugal	92
Canada	94	Islande	110	République Tchèque	92
Communauté européenne	92	Italie	92	Roumanie*	92
Croatie*	95	Japon	94	Royaume-Uni	92
Danemark	92	Lettonie*	92	Slovaquie*	92
Espagne	92	Liechtenstein	92	Slovénie*	92
Estonie*	92	Lituanie*	92	Suède	92
USA	93	Luxembourg	92	Suisse	92
Russie	100	Monaco	92	Ukraine*	100

Tableau 1 : Engagements chiffrés de limitation ou de réduction des émissions pour les pays de l'annexe B dans le protocole de Kyoto en fonction du niveau d'émissions de référence (année 1990 sauf éventuellement pour les pays en transition marqués d'une étoile dans le tableau ci-dessus).

Ce succès ne doit pas masquer le fait que la négociation a donné lieu à des controverses très importantes, portant en particulier sur les conditions de la flexibilité et la possibilité pour les pays développés de réaliser une partie de leurs engagements en finançant des projets de réduction des émissions dans les pays hors de l'annexe B.

- Les négociations qui ont précédé Kyoto tout comme la conférence ont vu s'affronter l'approche par les politiques et mesures domestiques défendues par les Européens, et la notion de flexibilité via un marché de droits d'émissions du CO₂ prônée par les Américains. Ce point critique a finalement été résolu dans une formulation ambiguë : « *The Conference of Parties shall define the relevant principles, modalities, rules and guidelines [...] for emissions trading. The parties included in Annex B may participate in emissions trading for the purposes of fulfilling their commitments under Article 3. Any such trading shall be supplemental to domestic action for the purpose of meeting quantified emission limitation and reduction commitments under that Article.* » (Article 17).
- Le mécanisme d'implémentation conjointe développé à cette occasion pour permettre aux pays du Nord d'investir dans des projets réducteurs d'émissions au Sud a rencontré une hostilité très forte de la part du G-77²¹, pour qui il revenait uniquement à faire bénéficier le Nord d'opportunités de réduction des émissions à moindre coût sans aucune retombée pour le développement. A l'inverse, les USA devaient absolument pouvoir afficher en interne un mécanisme permettant d'accrocher les pays du Sud aux efforts de réduction des émissions, condition *sine qua non* fixée par le Congrès pour toute ratification. Le tour de passe-passe a été réalisé en introduisant un nouveau mécanisme, le Mécanisme de Développement Propre, qui prévoit la possibilité d'investissements au Sud, mais sans en préciser les modalités²².

²¹ Le groupe des 77 (G-77) a été créé le 15 juin 1964 par les soixante-dix-sept pays en voie de développement signataires de la « Déclaration Commune des 77 pays » à la fin de la première conférence des Nations-Unies sur le commerce et le développement (UNCTAD) à Genève. Ce groupe, dont le nom original est resté, compte aujourd'hui 133 membres. 18 Etats membres de l'ONU n'appartiennent ainsi ni à l'annexe B, ni au groupe de 77 : 9 républiques de l'ex-URSS (Arménie, Azerbaïdjan, Bélarus, Géorgie, Kazakhstan, Kirgizstan, Moldavie, Tadjikistan, Uzbekistan), l'Albanie, quatre micro Etats ainsi qu'Israël, le Mexique, la Corée du Sud et la Turquie.

²² Un troisième point d'achoppement a été la question des puits de carbone. Les pays forestiers, comme la Nouvelle Zélande ou les pays d'Europe du Nord, et dans une moindre mesure les USA et le Canada ont souhaité utiliser une approche de comptage des émissions nette des puits. Face à l'opposition résolue de l'Union Européenne et du G-77, pour qui ce système constituait un échappatoire commode et un risque pour l'avenir, le Protocole final ne reprend que l'expression de « *additional removal by sinks* » (article 6) dont le sens précis reste à préciser.

Malgré ces limitations, le Protocole de Kyoto constitue une avancée particulièrement significative dans la mesure où, pour la première fois, des pays s'engagent sur des objectifs contraignants de réduction des émissions de gaz à effet de serre. Contrairement à l'image négative qui en a parfois été donnée dans les médias, ces cibles sont particulièrement ambitieuses à l'horizon 2010. Par rapport aux trajectoires d'émissions de référence les plus couramment admises, elles signifient un taux de réduction des émissions de 29% pour les USA, de 27% pour l'Union Européenne et globalement de 19% pour l'ensemble de l'annexe B (AIE&OCDE, 1999), ce qui est tout à fait considérable. De nombreuses questions-clés sont cependant renvoyées à des COP ultérieures : la question du *trading* ou celle du mécanisme de développement propre sont pour le moment loin d'être réglées. La sixième Conférence des Parties de La Haye (2000) constitue une date butoir sur ces deux points. *Last, but not least*, la ratification du Protocole par plus de 55 pays représentant plus de 55% des émissions de l'annexe B en 1990 est loin d'être acquise. Le Congrès américain s'oppose en particulier violemment à toute réduction des émissions aux USA tant que les pays en voie de développement ne se seront pas engagés dans la même voie (Résolution Byrd du Sénat Américain, 12 juin 1997).

2. Problématique : de l'économie « pure » à la négociation autour d'un bien public futur

Du point de vue de l'économiste, la qualité du climat de la planète peut être « trivialement » considérée comme un bien public. Il est en effet impossible d'empêcher un individu de jouir ou au contraire de subir le climat de la planète (propriété de non-exclusivité). De plus, le nombre de personnes qui en profitent n'est pas limité (propriété de non rivalité). Ce bien public peut en outre être qualifié de global car il concerne l'ensemble des habitants de la planète (Nordhaus, 1999a). Il n'y a pas ici à proprement parler de « consommation » de ce bien, qui est par nature la même pour tous que ce soit aujourd'hui ou demain. Simplement, tout changement dans les caractéristiques du climat a un impact sur le bien-être des individus : nous avons vu que ces impacts du changement climatique dépendent de la région, des activités économiques et des préférences des agents. De ce point de vue, le bien public le plus proche pourrait être la Défense Nationale, dont tous les Français « disposent » à stricte égalité, mais dont toute modification affecte de manière variable le bien-être des individus en fonction de leur conviction et de leur perception des risques.

La qualité du climat présente cependant une différence fondamentale par rapport à la Défense Nationale : la « consommation » du bien public y est largement postérieure à sa « production ». Nous finançons en effet chaque année par nos impôts le maintien en état et le fonctionnement de nos forces armées. Les équipements et les personnels ne sont certes pas renouvelés tous les premiers janvier, mais il existe tout de même une relative simultanéité entre le financement du bien public et sa consommation. Dans le cas de l'effet de serre, l'inertie propre au système climatique ajoutée au fait que le climat soit influencé par le stock de GES accumulés et non par les flux annuels, induisent un décalage temporel très important entre les émissions et le changement climatique. Le bien public climat peut donc être qualifié de futur, en ce sens qu'il est produit par notre génération, mais sera utilisé par les suivantes.

Nous nous trouvons ainsi devant un double problème de distribution intertemporelle. Il s'agit en premier lieu d'arbitrer entre le niveau de production du bien public aujourd'hui et l'impact sur le bien-être des générations de demain. Mais le fait que le changement climatique dépende du stock de CO₂ en ajoute un second. En effet, la qualité du climat à un horizon donné, par exemple 2100, ne dépend pas seulement de nos propres émissions, mais aussi de celles de nos descendants jusqu'à cette date. Construire une politique climatique susceptible de limiter la concentration atmosphérique en CO₂ à cette date suppose donc aussi de distribuer dans le temps la « production » du bien public climat. A ces deux questions temporelles s'ajoute la question de distribution spatiale standard en économie publique : comment répartir les contributions à l'effort de réduction des émissions entre des individus dont les conditions de vie comme les préférences sont très différentes ?

Cette énumération ne doit pas masquer le fait que ces trois questions de distribution ne sont ni symétriques, ni indépendantes. La dissymétrie tout d'abord provient essentiellement du fait que dans la pratique seuls les membres de notre génération peuvent effectivement se retrouver pour négocier. Les individus à venir sont des tiers absents qui ne peuvent « exister » que par la voix de porte-parole. A ce titre, la distribution future des coûts dépend avant tout de la représentation que nous nous formons de l'environnement économique et des préférences de nos descendants. L'interdépendance provient précisément du fait que dans l'actuel système de conventions qui régit les relations internationales, tout se passe comme si chaque Etat était légitime à parler au nom de ses propres descendants. La négociation sur la distribution aujourd'hui est donc *a priori* aussi une négociation sur la distribution des coûts demain en même temps qu'une négociation sur le niveau optimal de bien public qu'il est nécessaire de produire.

A ce stade de la discussion, nous nous trouvons encore face à un problème de financement d'un bien public somme toute relativement classique. La possibilité de le produire à deux périodes différentes apparaît certes comme une différence par rapport au cadre standard d'un bien public « immédiat » étudié par Bowen (1943), Lindhal (1919) et Samuelson (1954), et nous verrons d'ailleurs au chapitre 4 que cette propriété change à la fois la nature et les conditions dans lesquelles l'équilibre coopératif peut s'établir. Nous restons malgré tout dans le même univers logique : celui de la décision en univers certain.

Ce qui précède est déjà fort compliqué, mais fait encore l'impasse sur le fait qu'à cause des inerties climatiques et économiques, nous devons décider aujourd'hui sans que les incertitudes soient résolues. Le bien public climat est donc fortement incertain. L'incertitude porte à la fois, nous l'avons vu, sur les coûts de réduction des émissions, donc sur la « production » du bien, et sur les dommages du changement climatique, donc la manière dont il est « consommé ». Bien entendu, la recherche scientifique et l'expérience sont susceptibles de réduire ces incertitudes dans le futur. Nous nous trouvons donc devant un problème de décision en situation d'incertitudes et d'information croissante. Dans ce contexte, nos choix sont susceptibles d'être révisés par nos descendants, et les possibilités d'adaptation à une « surprise » climatique deviennent déterminantes dans l'évaluation des politiques publiques. Nous changeons ainsi radicalement d'approche : il ne s'agit plus d'arbitrer entre des efforts aujourd'hui, des efforts demain, et un état du climat après-demain, mais entre des efforts aujourd'hui, des climats possibles après-demain, et donc des coûts possibles demain.

Franchissons une étape supplémentaire en remarquant qu'il est absolument nécessaire que les générations futures entreprennent des efforts de réduction des émissions en plus de notre génération pour atteindre tout objectif climatique un tant soit peu sérieux (Tol, 1998). Or nous ignorons tout des préférences de nos descendants comme des anticipations qu'ils pourront formuler en matière climatique. Rien ne nous indique qu'ils mettront bien en œuvre les politiques que nous souhaiterions aujourd'hui les voir adopter. L'inertie du capital ou l'orientation du progrès technique nous fournissent certes des outils pour réduire leurs marges de manœuvre, mais leur manipulation est coûteuse et pour le moins discutable. Nous nous trouvons donc dans l'univers du pari sur le comportement des générations futures. Dans un tel contexte, on pressent, et nous le vérifierons, que les notions de distribution temporelle des coûts et d'objectif d'une politique climatique perdent leur sens « commun ». En effet, si nous ignorons ce que feront nos descendants, que signifie se donner un objectif environnemental ? Sur quels arguments peut-on alors fonder et évaluer une politique de réduction des émissions que nous entreprendrions tout de même aujourd'hui ?

Malgré son apparente trivialité, l'interprétation du changement climatique comme un problème de production d'un bien public conduit à un problème de fond sur l'articulation entre action de court terme et enjeux de long terme dans l'incertain. L'objet du présent travail est précisément d'examiner dans quelle mesure l'économie publique nous permet de penser les politiques visant à contrôler la production d'un bien public futur dans un contexte de fortes incertitudes, tant dans leurs objectifs que dans la distribution temporelle et spatiale des efforts. De fait, notre objectif n'est pas tant de révéler la « bonne » politique climatique, que de réfléchir à la manière de bien poser le problème. Autrement dit, l'objet de cette thèse est de construire la problématique.

En outre, la question posée déborde largement du seul champ de la théorie économique. En effet, puisque la notion d'intérêt collectif se fait moins immédiate dès lors que le bien considéré est futur et incertain, la légitimité de l'économie dans le débat public devient problématique. Dans un contexte intellectuel où le spectre de « l'horreur économique » n'est jamais très éloigné, le risque est grand de voir finalement tout discours de nature économique sur le long terme purement et simplement disqualifié. Pour être pertinents du point de vue de la décision, nous devons donc en parallèle comprendre comment le calcul économique peut être utilisé en pratique pour « *introduire un peu de rationalité dans la discussion* » selon le mot d'Alan Manne.

De fait, la thèse que nous défendrons ici sera double. Nous montrerons d'une part que l'introduction de l'incertitude oblige à fonder les politiques climatiques sur un arbitrage entre les coûts aujourd'hui et la nature de l'héritage que nous transmettons à nos descendants, cet héritage comprenant à la fois un contenu en richesse et en environnement, mais aussi et surtout une flexibilité et des potentiels d'adaptation. Nous montrerons d'autre part que l'enjeu central pour la décision est la vision du monde futur sur laquelle vont finalement s'accorder les agents. Si le calcul économique n'est pas en mesure de trancher entre ces différents futurs en compétition, il conserve par contre un rôle important à la fois pour démontrer et pour hiérarchiser l'incertitude qui pèse sur la décision de court terme.

Le dessin de politiques environnementales à long terme et dans un contexte d'incertitudes ne constitue nullement un terrain vierge. Nous nous situons au contraire au cœur de deux débats très vastes. Le premier concerne la définition de ce que pourrait être les chemins d'un développement soutenable à long terme. Le second porte sur les choix de politiques publiques sous incertitudes environnementales. Il mobilise de nombreux concepts tels que la valeur d'option ou de l'information, les « *safe minimum standards* » ou le principe de précaution, popularisé à la conférence de Rio et pourvu d'une indéniable puissance de mobilisation, mais pour le moment résistant à toute définition trop précise de son contenu. Nous n'aborderons pas dans cette introduction le détail de chacun de ces débats. Il importe simplement de mesurer ici l'ampleur et la vigueur des controverses qu'ils soulèvent. L'évaluation monétaire des actifs environnementaux ou l'utilisation d'un taux d'actualisation strictement positif font par exemple l'objet de critiques virulentes. Plus généralement, la pertinence même des outils de l'analyse économique, et en particulier de l'analyse coûts avantages, pour examiner les problèmes de long terme est fortement remise en cause au nom de principes de nature éthique.

Nous reviendrons en détail dans le texte sur les différents aspects de cette littérature. A ce stade de notre discussion, nous en tirons simplement l'idée suivante : ces débats sont cependant suffisamment difficiles et complexes pour nous inciter à adopter ici une approche très prudente. Nous nous proposons ainsi de raisonner en trois temps. Dans une première partie, nous développerons un modèle numérique comportant un seul agent par génération avec lequel nous étudierons la distribution temporelle des coûts des politiques climatiques. Cette maquette très simple n'a d'autre prétention que de clarifier les enjeux en articulant les différents éléments du problème climatique en un seul objet, et en produisant des ordres de grandeurs numériques. Puisque nous nous limitons à la question intergénérationnelle, le fil conducteur de cette première partie sera naturellement le taux d'actualisation dont nous examinerons l'impact sur les politiques climatiques. Le chapitre 1 sera consacré à l'univers certain. Le second chapitre nous permettra quant à lui d'introduire les concepts théoriques nécessaires pour construire un modèle d'évaluation des politiques climatiques en situation d'incertitude que nous développerons au chapitre 3. L'ensemble de ces résultats numériques nous conduira à remettre en cause l'idée selon laquelle le taux d'actualisation résumerait à lui seul l'ensemble du débat sur l'arbitrage entre court terme et long terme.

Dans la seconde partie, nous reviendrons à la théorie pour discuter ce résultat. Le chapitre 4 sera consacré à l'analyse théorique du problème de la distribution optimale des coûts de production d'un bien public futur en présence d'incertitudes. Il clarifiera en particulier les conditions dans lesquelles la distribution spatiale des coûts d'abattement peut être supposée indépendante de la distribution et temporelle. En revenant sur les fondements théoriques du taux d'actualisation, nous vérifierons au chapitre 5 que sa valeur ne saurait être modifiée sans grande précaution. En introduisant la notion de nature de l'héritage, le chapitre 6 montrera enfin que le taux d'actualisation n'est qu'un élément de la

décision en matière climatique au même titre que la nature de ce que nous transmettons à nos descendants, et en particulier la flexibilité. Nous verrons aussi que la valeur du taux d'actualisation, et plus globalement la nature du résultat du calcul économique, est fortement dépendante de la nature des anticipations sur la trajectoire d'évolution future de l'économie. Nous retrouverons ainsi un résultat déjà énoncé en 1949 par Gabriel Dessus dans son célèbre apologue : résultat très simple, mais dont on mesure parfois mal toutes les conséquences.

En effet, puisque les paramètres du calcul économique sont eux-mêmes subordonnés à la nature des anticipations sur la trajectoire économique future, la notion d'intérêt collectif ne constitue plus un recours suffisant. Dans ce contexte de décision collective sous controverses (Godard et Hourcade, 1991, Hourcade, 1991, Godard, 1993), la question n'est plus d'agréger les intérêts particuliers, mais de choisir parmi diverses théories en compétition sur le futur, entre lesquelles le calcul économique est incapable de trancher. Nous pouvons alors formuler l'hypothèse selon laquelle, devant la complexité du problème, les acteurs vont en pratique chercher à s'entendre sur des règles simples. Dans le cas du problème climatique, ce sont les règles d'élargissement de l'annexe B du protocole de Kyoto aux pays en voie de développement pour l'après 2012. Toute la question est alors de savoir dans quelle mesure le calcul économique peut aider à la négociation sur de telles règles. Le chapitre 7 nous permettra de planter le décor en décrivant les contraintes politiques et la multiplicité des scénarios de référence qui pèsent sur cette discussion. Nous développerons au chapitre 8 un petit modèle d'évaluation du fonctionnement d'un marché de permis d'émissions négociables qui nous montrera que différentes règles d'élargissement proposées dans la littérature ne sont pas robustes à la trajectoire de référence. Nous en profiterons pour discuter l'approche par les quantités du protocole de Kyoto, et nous interrogerons enfin au chapitre 9 sur le statut de nos résultats dans un contexte aussi fortement incertain.

Avant d'entamer notre route, notre projet nécessite une clarification méthodologique. Aux yeux de nombreux auteurs, non économistes comme économistes, l'analyse économique n'est pas fondée à se préoccuper de questions de distribution (qu'il s'agisse de distribution temporelle ou spatiale importe peu). En séparant équité et efficacité, le second théorème de l'économie du bien-être délimiterait alors les frontières du territoire de l'économiste : à lui la recherche de l'organisation la plus efficace des moyens de production, à d'autres, politiques ou philosophes, de dire qu'elle serait la distribution souhaitable.

Les conditions de validité du second théorème sont cependant très restrictives, et dans de nombreux cas (voire dans la majorité ?), celles-ci ne s'avèrent plus vérifiées (Guesnerie, 1995, Chichilnisky *et al.*, 1999). L'économiste ne peut plus esquiver la question de la distribution. En outre, pas plus qu'en économie, il n'existe de théorie éthique qui primerait sur les autres et s'imposerait d'évidence pour dicter la nature de nos choix (Godard, 1999). Or les choix distributifs, au moins en matière de changement climatique, ont des conséquences économiques particulièrement importantes. L'économiste apparaît alors avoir un rôle à jouer pour expliciter les conséquences de ces choix et aider ainsi, à côté du raisonnement éthique, à la décision.

Nous adoptons ici l'approche proposée par Amartya Sen, qui, après avoir souligné la double origine de l'économie fille des sciences morales d'une part et des économistes ingénieurs de l'autre, déplore ainsi de manière symétrique la séparation entre économie et éthique : « *La seconde précision concerne la double nature de la perte résultant de l'affaiblissement du point de vue éthique dans l'économie. Jusqu'à maintenant, j'ai examiné ce que la science économique perdait en négligeant la conception éthique de la motivation et de l'accomplissement social [...]. Mais je voudrais montrer aussi que les méthodes utilisées ordinairement en économie, liées entre autres à la conception « mécaniste », comportent des éléments qui peuvent être utiles à l'éthique moderne : la séparation de l'économie et de l'éthique s'est donc également faite au détriment de l'éthique.* » (1987, pp.12-13).

Terminons par un commentaire sur la démarche que nous venons de présenter. L'objet de cette thèse est finalement d'examiner comment prendre en compte les enjeux de long terme dans la décision en situation de fortes incertitudes. Devant la complexité du problème posé, et peut-être du fait de notre

formation d'ingénieur, nous adoptons volontairement une progression du plus simple au plus complexe. Nous débutons ainsi par un modèle à un agent et un bien en univers certain. L'introduction de l'incertitude nous oblige à réviser cette première approche balistique et à poser la question de l'héritage que nous léguons à nos descendants. Mais dès lors que cette question est posée, il est nécessaire de mieux définir ce que l'on lègue, et donc de passer à plusieurs biens. Il nous faut par ailleurs nous interroger sur la nature des compromis à court terme qui permettent de décider de la nature de cet héritage, et donc passer à plusieurs agents. Nous aboutissons ainsi à un monde dont nous reconnaissons l'hétérogénéité des techniques comme des nations et des agents, ce qui nous permet finalement d'aborder la question de la négociation internationale.

Première Partie

**De la balistique au tâtonnement :
approche numérique de la décision en
matière d'effet de serre**

Chapitre 1 Une pure métaphore : un agent et un bien en nivers certain

La multiplicité et la complexité des discours autour du changement climatique, la diversité des ordres de justification invoqués, tantôt éthiques, tantôt économiques, l'utilisation de concepts encore non stabilisés comme le « principe de précaution » ou le « développement durable » ou encore la présence de points de vue fondamentalement critiques sur les bases mêmes de la boîte à outils économique tendent à obscurcir le débat sur les politiques à mener face à l'effet de serre, dont la base physique, le changement climatique, est déjà passablement compliquée et controversée.

Nous nous proposons dans cette première partie de tenter d'y voir un peu plus clair à l'aide d'un modèle numérique d'optimisation des politiques climatiques. Nous nous plaçons d'emblée dans le champ de l'économie publique, et l'évaluation coûts avantages nous fournit alors un cadre logique adapté pour intégrer dans une même analyse l'ensemble des éléments qui concourent à la décision en matière d'effet de serre : comme le disent Partha Dasgupta, Amartya Sen et Stephen Marglin dans leur ouvrage sur l'évaluation de projets *« When one project is chosen rather than another, the choice has consequences for employment, output, consumption, savings, foreign exchange, earning and other things of relevance to national objectives. The purpose of social benefit-cost analysis is to see whether these consequences taken together are desirable. »* (1972, p.11).

Trente ans de débats économiques ont abondamment souligné les forces et les faiblesses de l'analyse coûts avantages appliquée aux politiques environnementales. Le lecteur se convaincra d'ailleurs du caractère récurrent de ce débat en consultant les débats présentés dans Sachs (1972). L'utilisation de cette approche est en effet rendue difficile par le fait qu'elle requiert au préalable d'avoir répondu, au moins pour le cas particulier considéré, à quatre questions fondamentales :

- Comment arbitrer entre environnement et consommation ? Les coûts et les bénéfices des politiques environnementales sont en effet souvent mal ou pas du tout médiatisés par la modification des prix relatifs de biens marchands. Il est dès lors particulièrement difficile de les traduire dans la métrique monétaire pourtant nécessaire à l'analyse coûts avantages. Cette difficulté est d'autant plus importante et difficile que les politiques considérées peuvent se traduire par des victimes humaines.
- Comment comparer le bien-être de deux individus ? La maximisation d'une fonction de bien-être collective conduit à un équilibre de Pareto. Il existe cependant autant d'équilibres différents que de pondérations des utilités des différents individus qui composent cette collectivité. Le choix du jeu de poids conditionne donc largement la nature des politiques qui passeront le test de l'analyse coûts avantages, ou du moins le montant des redistributions qu'il serait nécessaire de mettre en œuvre pour les rendre acceptables.
- Comment comparer le bien-être de deux individus à des dates différentes ? La comparaison de politiques publiques s'étendant dans le temps nécessite de disposer d'un système d'agrégation permettant de ramener les coûts et bénéfices futurs à des valeurs présentes équivalentes. La valeur de ce facteur d'actualisation, qui intègre à la fois des informations sur la productivité marginale du capital futur et sur la nature des préférences des agents, s'avère d'autant plus importante que les politiques considérées ont des conséquences à long terme.
- Comment prendre en compte l'incertitude ? Il n'existe pas de choix absolument évident d'un critère de décision en univers incertain. Même si l'on ne récuse pas l'approche probabiliste, l'utilisation du critère d'espérance de l'utilité dans un contexte d'information croissante doit faire l'objet de précautions particulières. En outre, le choix des probabilités subjectives s'avère

difficile. De même, les valeurs d'option s'avèrent difficiles à calculer *ex ante* en cas d'irréversibilité.

Malgré l'apparente simplicité de la méthode, utiliser l'analyse coûts bénéfices conduit en fait à poser quatre questions centrales pour l'évaluation des politiques climatiques. L'effet de serre étant un phénomène global, s'étendant sur le très long terme, dont les conséquences environnementales sont largement non marchandes et dont les différents paramètres sont fortement controversés, aucune de ces questions ne peut être évitée. Toute le problème est donc maintenant de les articuler convenablement. En premier lieu, et conformément à la démarche allant du simple au complexe que nous avons adoptée en introduction, nous nous limitons dans cette première partie à un modèle comportant un seul agent « représentatif » par génération. Ce choix laisse donc de côté la question de la répartition entre pays des coûts et des bénéfices des politiques climatiques. Nous y reviendrons en détail au chapitre 4, en vérifiant l'hypothèse implicitement formulée ici selon laquelle les distributions spatiales et temporelles des coûts des politiques climatiques peuvent être séparées. En conséquence logique de ce choix, la discussion sur la distribution temporelle des coûts des politiques climatiques devient à partir de maintenant et pour toute la première partie, la question distributive centrale. Nous ne pouvons ici éviter la discussion sur la valeur du taux d'actualisation, qui occupe la plus grande place dans les débats sur l'équité intergénérationnelle.

Nous avons abondamment souligné en introduction l'importance des incertitudes. La représentation de l'incertitude dans un modèle numérique demande cependant de sérieuses précautions. En outre, nous vérifierons que plusieurs éléments essentiels pour le débat sur l'évaluation des politiques climatiques se trouvent déjà dans un contexte certain. De fait, nous ferons dans ce premier chapitre « comme si » nous avions tous les éléments de la décision en main. Nous reviendrons dans les deux chapitres suivants sur le cas incertain. Notre souci d'introduire progressivement les difficultés pourra paraître se payer ici d'un prix trop lourd : cette thèse consacrée à l'incertitude débute en effet en univers certain. Le paradoxe n'est cependant qu'apparent : le fonctionnement d'un modèle d'évaluation économique revient toujours *in fine* à assigner une valeur numérique aux différents paramètres de l'évaluation, coûts d'abatement et dommages compris. Le point important est par contre de savoir comment le résultat est obtenu, c'est-à-dire dans quelle mesure le critère de décision retenu correspond à un comportement « raisonnable » face à l'incertitude, et comment les résultats des différentes simulations sont interprétés. Il serait donc plus juste de dire que ce premier chapitre présente des décisions optimales qui ne prennent pas en compte toute l'information disponible sur les incertitudes

Sur les quatre questions soulevées par l'analyse coûts bénéfices que nous avons isolées plus haut, trois sont maintenant situées dans notre démarche. L'arbitrage présent futur sera introduit dans ce chapitre, l'incertitude « apparaîtra » au chapitre 2, et nous repoussons à la seconde partie la question de la comparaison entre le bien-être de deux individus d'une même génération. Il reste la question de l'arbitrage entre consommation et environnement, à laquelle nous consacrons la première section de ce chapitre. Nous reviendrons en section 2 sur la question de l'arbitrage entre utilités présentes et futures, avant d'introduire notre modèle numérique d'évaluation des politiques climatiques en section 3 et d'en discuter enfin dans une dernière section les résultats obtenus en univers certain¹.

¹ Ce premier chapitre, et en particulier les sections 2 et 3, s'inspirent d'une communication à l'IIASA et au PIREVS (Lecocq et Hourcade, 1997, Hourcade et Lecocq, 1997).

1. Coûts bénéfiques ou coûts efficacité ?

1.1. Un débat rhétorique à remettre à sa juste place

Depuis le début des années 70, avec le choc pétrolier et la fin de la longue période de croissance de l'après guerre, la question de la durabilité ou de la soutenabilité de la croissance à long terme se pose de manière aiguë. Depuis la publication du rapport Meadows sur les limites de la croissance (1972), une pléthore d'articles ont été ainsi consacrés à la capacité de nos économies à soutenir durablement un rythme de croissance élevé malgré l'épuisement inéluctable des ressources naturelles. En reprenant et en complétant la typologie de Turner (1992), Olivier Godard (1994) présente le paysage intellectuel du développement durable en distinguant trois conceptions principales de la soutenabilité :

- la soutenabilité « très faible » de Solow : un schéma de croissance sera dit soutenable s'il permet de conserver de façon indéfinie la capacité productive des sociétés humaines, étant entendu que le capital ne se limite pas aux équipements productifs, mais comprend aussi les actifs qui contribuent à engendrer du bien-être dans le futur : savoir et actifs naturels (Solow, 1992). Le postulat de cette approche est que le capital naturel, à l'exception d'actifs uniques, est substituable par du capital artificiel.
- la soutenabilité « faible » ne fait que reprendre le modèle précédent en lui rajoutant des contraintes pour tenir compte des limites physiques aux mécanismes de substitution entre capital naturel et capital artificiel. Sous la contrainte du respect de ces contraintes, nous restons dans le même paradigme que dans la soutenabilité « très faible » : conserver la quantité totale de capital artificiel comme naturel.
- Avec la soutenabilité « forte » s'opère un saut conceptuel très important. La substitution entre capital naturel et capital artificiel est en effet posée comme impossible. Toute dégradation du capital naturel demande alors restauration du même capital naturel au nom des spécificités physiques du capital naturel, mais aussi de l'impératif éthique de transmission d'un capital naturel intact à nos descendants (Costanza et Daly, 1987).

L'écart entre soutenabilité « très faible » et « faible » d'un côté et soutenabilité « forte » de l'autre repose ainsi essentiellement sur la représentation de la substituabilité entre actifs naturels et actifs artificiels, qui se pose à deux niveaux :

- La fonction de production : les biens environnementaux constituent des facteurs de production importants et pour partie d'entre eux nécessaires, au moins dans l'état actuel de nos technologies. Depuis les années 70, la course de vitesse entre épuisement des ressources naturelles et progrès technique a fait l'objet d'importantes recherches en économie de l'environnement.
- La fonction d'utilité : même s'ils ne sont pas nécessaires à la production, les biens d'environnement peuvent avoir une valeur en soi, en ce sens que leur présence, directe ou simplement reconnue, apporte du bien-être aux agents. Toute la question est alors de révéler la valeur implicite que les agents attachent à ces biens en l'absence d'un système de prix.

Contrairement à l'idée selon laquelle réfléchir au développement durable imposerait de « dépasser l'économie néo-classique » (Costanza et Daly, 1987, Faucheux et Noël, 1985), il est important de remarquer que la boîte à outils néoclassique n'est *a priori* disqualifiée dans aucun des cas. Une fois données les conditions de la substituabilité ainsi que les limites physiques du capital naturel (capacité de charge maximale par exemple, points de non retour de la pollution, etc.), il est en effet possible d'appliquer les principes généraux de l'analyse économique pour réfléchir à la meilleure trajectoire de croissance qui tienne compte de ces contraintes. En ce sens, la nature particulière de l'objet

environnement ne constitue pas en soi un argument pour abandonner les concepts fondamentaux de l'analyse économique. La possible présence de contraintes environnementales pose par contre la question d'une possible substitution de l'analyse coûts bénéfices (ou coûts avantages) par l'analyse coûts efficacité, qui consiste à maximiser une fonction de bien-être collective sous contrainte.

Dans ce débat, la Convention Cadre sur le Changement Climatique signée à Rio en 1992 constitue une innovation très importante dans le champ des politiques environnementales internationales². Son article 2 stipule en effet que *« l'objectif ultime de la présente Convention [...] est de stabiliser [...] les concentrations de gaz à effet de serre dans l'atmosphère à un niveau qui empêche toute perturbation anthropique dangereuse du système climatique. Il conviendra d'atteindre ce niveau dans un délai suffisant pour que les écosystèmes puissent s'adapter naturellement aux changements climatiques, que la production alimentaire ne soit pas menacée, et que le développement économique puisse se poursuivre de manière durable. »*

La Convention Cadre sur le Changement Climatique introduit ainsi la notion d'un seuil de danger environnemental à ne pas dépasser. Le phrasé de la Convention traduit ainsi spectaculairement une méfiance diffuse mais générale, chez les non économistes comme chez une partie des économistes, à l'égard de l'analyse coûts avantages pour l'évaluation d'un problème aussi incertain que le changement climatique (Hourcade, 1997). Cette défiance était renforcée au début des années 90 par le décalage entre les prévisions alarmistes du GIEC (Théry, 1997) et les résultats pour le moins mesurés de la première analyse coûts avantages du problème climatique menée par W.D. Nordhaus (1991).

Plusieurs équipes de recherche ont tenté d'explorer des variantes plus élaborées de l'analyse coûts efficacité en se donnant une série de contraintes de nature climatique permettant de calculer à rebours l'ensemble des chemins possibles pour satisfaire ces contraintes. Toth *et al.* (1997) développent ainsi le concept de fenêtre d'opportunité (*« tolerable window »*). Ces auteurs se donnent un jeu de contraintes relatives aux tensions maximales que peuvent subir à la fois les écosystèmes et les économies, puis *« inversent »* un cycle du carbone pour présenter les trajectoires d'émissions compatibles avec ces contraintes.

De même, le RIVM³ développe la notion d'atterrissage en douceur (*« safe landing »*) et de couloirs de sécurité (*« Safe emission corridors »*) (Alcamo et Kreileman, 1996, Swart *et al.*, 1998). L'idée est à nouveau de calculer les trajectoires d'émissions de GES compatibles avec la satisfaction de contraintes d'ordre climatique et économique, portant à la fois sur l'augmentation maximale et la vitesse de variation de la température, l'augmentation du niveau de réduction des émissions et un taux maximal annuel de réduction des émissions.

L'ambition commune de ces deux approches est de construire un jeu d'objectifs minimaux des politiques climatiques, fondés sur des bases plus solides et plus détaillées que la simple donnée d'un seuil absolu en termes de concentration. Cette approche multicontrainte présente l'intérêt de faire apparaître des paramètres cachés par l'analyse en termes de plafond de concentration, et en particulier la vitesse du changement climatique. Cependant, la taille de ce corridor est contrôlée par un paramètre critique : le taux maximal de réduction des émissions. En effet, si une telle limite n'était pas fixée, le corridor serait soit vide (les contraintes climatiques que nous nous fixons sont déjà dépassées), soit extrêmement large (puisque nous pourrions attendre sans rien faire que la contrainte soit atteinte puis stopper tout d'un coup nos émissions). Or cette vitesse maximale de réduction des émissions repose nécessairement sur une analyse économique et non plus climatique (Enting, 1995).

De plus, s'il existe des bases théoriques solides pour le calcul du corridor de sécurité, en particulier la théorie de la viabilité (Aubin, 1997), le choix de la bonne trajectoire d'émissions, une fois l'ensemble des solutions admissibles déterminé, reste délicat. Soit en effet cet ensemble est non vide et il faut alors choisir la bonne trajectoire d'émissions à l'intérieur de cet ensemble des possibles en arbitrant

² La Convention Cadre sur le Changement Climatique a été ratifiée par 180 pays au 1^{er} janvier 2000.

³ Institut National pour la Santé Publique et pour l'Environnement, Bilthoven, Pays-Bas.

entre la sécurité (rester éloigné des frontières) et les coûts. Soit cet ensemble est vide⁴, et il faut alors choisir quelle(s) contrainte(s) violer. Dans les deux cas, nous nous trouvons devant la nécessité d'un arbitrage entre les coûts de l'action et les coûts des contraintes. Si l'analyse par contraintes est particulièrement utile pour révéler les cohérences, et surtout les incohérences entre différents discours, elle ne saurait constituer un critère de décision à part entière. Au moment du choix, l'analyse coûts avantages revient « par la fenêtre » : toute discussion sur les contraintes en présence d'incertitudes, revient pour en effet chaque décideur à pondérer implicitement les coûts et les bénéfices du changement climatique (Hourcade, 1997). Toute la question est donc de savoir comment révéler les coûts implicites de chacune des contraintes. Or, lorsque ces contraintes concernent des biens non marchands ou éloignés dans le futur, il est difficile de faire apparaître les prix implicites que les agents leur attachent. Nous examinons successivement ces deux questions.

1.2. La difficile monétarisation des impacts

Les dommages potentiels du changement climatique sont, nous l'avons vu, de nature très diverse, et une grande partie d'entre eux ne concernent pas directement des biens ou des services marchands (mortalité accrue liée aux événements climatiques extrêmes, aux inondations, ou aux épidémies résultant du réchauffement climatique, perte de biodiversité, disparition de zones côtières ou d'étendues forestières, etc.). Or l'analyse coûts avantages nécessite *in fine* de disposer d'une évaluation agrégée des dommages qui doivent donc être évalués dans une métrique commune, en général monétaire. Il n'est pas le lieu ici de reprendre l'ensemble de la très vaste littérature consacrée à cette question, mais simplement d'articuler les débats qu'elle soulève :

- L'hypothèse fondamentale est que les agents ont une fonction d'utilité qui inclut à la fois les biens de consommation et l'environnement. La première question est donc de révéler la nature de ces préférences. Puisque les biens environnementaux ne sont pas directement observables sur le marché, l'idée fondamentale des méthodes d'évaluation contingente consiste à associer des variations monétaires à des modifications de bien-être engendrées par une variation de la quantité offerte d'un bien rationné. L'application pratique de cette méthode présente cependant un certain nombre de difficultés procédurales pour éliminer les biais.
- Une fois ces préférences révélées, se pose la question de leur agrégation. La disponibilité à payer pour l'environnement observée dépend en effet du revenu de l'agent considéré. Une telle analyse peut ainsi conduire à des biais dès lors qu'elle est conduite dans des pays en voie de développement dont la richesse est plus faible que la nôtre. Il est certes possible de corriger ces effets au moyen de poids différenciés des utilités des individus, mais le choix de ces poids est lui-même problématique.
- En troisième lieu, l'arbitrage entre environnement et consommation n'a pas de raison *a priori* de rester inchangé en fonction de la richesse. Il est possible que la préférence pour l'environnement soit une fonction croissante du niveau de revenu. Dans ce contexte, l'évaluation future des bénéfices des politiques environnementales doit être repensée, mais un terme comme l'élasticité revenu de la préférence pour l'environnement est particulièrement difficile à évaluer.

L'effet de serre présente une nouvelle fois la particularité de pousser chacune de ces questions à leur paroxysme. Les dommages non marchands sont en effet nombreux, et de natures très différentes. Ils se produiront à l'échelle mondiale, ce qui oblige à penser l'agrégation entre individus de revenus très différents. Ils se produiront enfin dans un futur lointain, pour lequel les différents scénarios envisagent

⁴ Il ne s'agit pas ici d'un pur cas d'école. Alcamo et Kreileman (1996) introduisent par exemple une contrainte sur la vitesse d'augmentation de la température, mais précisent aussitôt que cette contrainte peut être violée pendant au plus 20 ans pour éviter d'obtenir un ensemble de solution vide.

D'une manière analogue, un pays comme l'Allemagne ne peut aujourd'hui à la fois refuser le nucléaire, refuser l'idée d'un marché international de permis d'émissions négociables et afficher dans le même temps des ambitions très importantes en matière de réductions d'émissions de GES.

une augmentation massive des revenus, dans les pays développés comme dans les pays en voie de développement. Différents auteurs se sont pourtant lancés dans une évaluation monétaire des dommages non marchands du changement climatique.

Dans la première analyse coûts avantages complète du changement climatique, Nordhaus (1992a et b) évalue les dommages marchands aux USA pour une augmentation 3°C à 0,25% du PIB américain. Il évalue ensuite les dommages non marchands à trois fois les dommages marchands, pour obtenir finalement un dommage total de 1% du PIB américain. En fonction de la part plus importante de l'agriculture dans l'économie de nombreux pays, il extrapole finalement un dommage total de 1,3% du produit mondial brut.

Cette première évaluation a été fortement critiquée. Tol (1994) démontre ainsi qu'en introduisant directement les dommages non marchands dans la fonction d'utilité du modèle, et en supposant de plus que la disponibilité à payer pour l'environnement augmente avec le niveau de richesse, le niveau de dommage pour une élévation de la température de 3°C passe de 1,3% à plus de 2% du produit mondial brut. Le niveau optimal de réduction des émissions triple alors par rapport à l'analyse initiale. Plusieurs auteurs, dont Cline (1993), ont présenté à la même époque des estimations plus élevées que celles de Nordhaus.

Les évaluations de Fankhauser (1995) et de Tol (1995) ont suscité une attention particulière. Ces études donnaient en effet une valeur statistique de la vie (VSV ou « *value of statistical life* » en anglais) largement plus élevée dans les pays développés que dans les pays en voie de développement. Bien que ces deux auteurs aient pris soin de souligner qu'ils ne faisaient que traduire numériquement le fait observable que la disponibilité à payer pour se prémunir d'un risque était plus élevée dans les pays développés que dans les pays en voie de développement, ces résultats ont suscité une très vive polémique.

Comme le rappelle Azar (1999), le problème central n'était pas la différence des VSV *en soi*. Pour évaluer un projet de développement national, un pays du Sud utilisera naturellement les chiffres traduisant les préférences de ses propres habitants. La question est par contre toute autre lorsque c'est le pays développé qui expose les habitants du pays en voie de développement à des risques de mortalité plus élevés. Nous reviendrons au chapitre 4 sur la question ainsi posée sur la comparaison des fonctions d'utilité, qui concerne, au-delà des dommages, l'ensemble des composantes non monétaires des dommages du changement climatique.

Après la publication du second rapport de l'IPCC (Pearce *et al.*, 1996), la monétarisation des dommages non marchands du changement climatique n'a plus fait l'objet d'un débat particulièrement intense au sein de la communauté des modélisateurs. Dans une revue de la littérature de 1998, Tol et Fankhauser montrent ainsi que les grilles d'évaluation des impacts non monétaires de 19 modèles intégrés du changement climatique proviennent essentiellement de cinq sources antérieures à 1995 (Tol, 1995, Fankhauser, 1995, Nordhaus, 1992a et b et Dowlatabadi et Morgan, 1993, Manne et Richels, 1995).

Cette relative désaffection ne signifie pas que la discussion sur les dommages ait été abandonnée. Simplement, l'attention se déplace de l'évaluation des dommages moyens à l'analyse du comportement des modèles en présence d'une catastrophe, dont le chiffrage est paradoxalement plus facile (Gjerde *et al.*, 1999). En outre, le développement de modèles d'évaluation intégrée de grande taille comme IMAGE (Alcamo *et al.*, 1998) a fait porter l'attention plus sur la description régionalisée des impacts écologiques et climatiques que sur leur évaluation monétaire. *Last but not least*, la signature du Protocole de Kyoto a focalisé le débat international sur les mesures nécessaires pour remplir les objectifs de réduction des émissions à l'horizon 2010 au moindre coût. La question de l'évaluation monétaire des dommages non marchands pourrait pourtant revenir sur le devant de la scène à l'occasion du débat sur les engagements de réduction des émissions que pourraient prendre les pays en voie de développement au-delà de 2012 (voir chapitres 7 et 8).

2. L'arbitrage présent futur sous l'angle de l'actualisation

Dans la littérature sur les problèmes d'environnement à long terme, le débat sur l'arbitrage entre génération présente et générations futures se réduit très souvent à la seule question de la valeur du taux d'actualisation. La fameuse controverse entre William Cline d'une part, Nancy Birdsall et Alan Steer de l'autre dans les colonnes de *Finance et Développement* en 1993 en constitue une illustration éclatante. Plus discrètement, le chapitre 4 du second rapport du GIEC, intitulé « *équité intergénérationnelle, actualisation et efficacité économique* » (Arrow *et al.*, 1996a) mais en fait exclusivement consacré au second de ces trois termes, est tout aussi révélateur. Dans la suite de cette première partie, nous serons conduits à nous remettre en cause le bien-fondé de cette identification. Et nous soutiendrons finalement aux chapitres 5 et 6 que l'arbitrage présent futur dépasse largement la seule question de l'escompte. A ce stade de la discussion, nous considérerons cependant comme acquise l'idée selon laquelle le débat sur la distribution des coûts des politiques climatiques entre le court terme et le long terme peut être correctement résumée par la discussion sur la valeur du taux d'escompte. La question pour nous est donc maintenant d'examiner ce qu'est ce paramètre, et quelles sont les valeurs qu'il est susceptible de prendre.

Commençons par rappeler pourquoi une procédure d'actualisation est nécessaire pour l'évaluation des politiques publiques. Supposons en effet que nous disposions d'une chronique exacte des coûts et des bénéfices agrégés des politiques climatiques exprimés en unités monétaires. Pour évaluer ces politiques, il nous faut disposer d'un moyen de comparer ces séries entre elles. Or, de telles séries ne sont en général pas directement commensurables : un projet A peut en effet entraîner des coûts très élevés au départ, mais générer ensuite des bénéfices plus importants qu'un projet B qui, lui, demande moins d'investissement dans les premières années. Déterminer laquelle de A, de B ou de ne rien entreprendre du tout est la meilleure politique demande de procéder à un arbitrage entre le présent et l'avenir.

Pour ce faire, l'économie publique dispose d'un outil : le taux d'actualisation, qui donne le nombre de francs futurs contre lesquels un agent est disposé à échanger un franc aujourd'hui. Ainsi, si r est le taux d'actualisation, 1 franc aujourd'hui est équivalent à $(1+r)^N$ francs dans N années. La somme des équivalents présents des flux monétaires futurs d'une politique donnée est appelée valeur actualisée nette. En pratique, la donnée d'un taux d'actualisation par l'autorité publique indique que ne seront retenues que les politiques dont la valeur actualisée nette calculée avec ce taux est positive. Le choix d'un taux d'actualisation public est ainsi un exercice normatif.

La « bonne » valeur à donner au taux d'actualisation pour l'évaluation des politiques publiques fait l'objet depuis le début du siècle d'un très vif débat à la fois parmi les économistes, mais aussi entre économistes et non économistes. Un historique complet reste à notre connaissance à écrire. Le lecteur trouvera néanmoins dans Dasgupta et Heal (1979) et dans Pearce et Turner (1990) quelques éléments de synthèse. Pour illustrer la prégnance historique du débat, les dates de quelques références (que nous discuterons en détail dans la suite) nous semblent parler d'elles-mêmes : Ramsey (1928), Harrod (1948), Koopmans (1960), Rawls (1971), Lind (1982), Chichilnisky (1996), Arrow *et al.* (1996a), Portney et Weyant (1999)...

Dans cette controverse, les politiques climatiques constituent un objet de choix. En premier lieu, il s'agit à la fois d'un problème d'exploitation optimale d'une ressource épuisable (la qualité de l'atmosphère) et d'un problème de croissance à très long terme, deux domaines qui ont été au cœur du débat historique sur l'actualisation. En second lieu, l'horizon temporel du phénomène amplifie très fortement l'importance numérique de l'escompte. Pour s'en convaincre, le lecteur pourra simplement noter qu'un million de francs dans dix ans équivalent à 745000 F aujourd'hui avec un taux d'actualisation de 3% contre 558000 F à 6%, soit un rapport de 1 à 1,3. La même somme dans un siècle équivaut à 52000 F aujourd'hui à 3%, contre 2950 F à 6%, soit un rapport de 1 à 18. En dernier lieu, l'importance des enjeux avive naturellement les controverses.

D'un point de vue théorique cependant, la signification de l'actualisation reste inchangée. Comme le note Marcel Boiteux en 1969, le choix du taux d'actualisation reflète fondamentalement la tension entre la productivité présente et future de l'économie d'une part et la quantité d'épargne disponible pour financer l'investissement public de l'autre. Si le taux retenu est trop élevé, alors le nombre de projets « rentables » (au sens où leur valeur actualisée nette est positive) sera trop faible et n'épuisera pas la quantité d'épargne disponible. A l'inverse, si le taux est trop faible, alors il faudra procéder à une nouvelle sélection à l'intérieur de l'ensemble des politiques qui passent le test de la valeur actualisée nette. A quantité d'épargne donnée, le taux retenu sera d'autant plus élevé que la productivité anticipée de l'économie sera plus importante.

Le taux d'actualisation traduit ainsi la cohérence entre trois ensembles d'éléments de nature très différente : l'état présent et futur des techniques de production des biens et des services, le comportement des agents, et en particulier leur propension à épargner, et la nature des institutions qui déterminent la quantité de ressources effectivement disponibles pour l'investissement public. Il nous faut maintenant examiner comment ils s'articulent, puis nous interroger sur le fait qu'ils sont dans la pratique très difficiles à observer.

2.1.1. Taux d'actualisation dans un modèle de premier rang

Nous nous donnons une économie fermée dont la technologie est représentée par une unique fonction de production à un deux facteurs capital et travail. A chaque période (indicées de manière discrète par t), la production du bien composite est répartie entre consommation et investissement, qui génère le surcroît de capital disponible pour la période suivante. Les préférences de l'individu représentatif, à la fois producteur et consommateur, sont données par une fonction de bien-être intertemporelle choisie comme la somme actualisée des utilités de la consommation à chaque période (équation 1.1). Toute la question est de déterminer le programme de croissance optimal de cette économie, qui va à son tour nous donner le taux d'actualisation.

$$U = \sum_{t=1}^{\infty} \frac{u(c_t)}{(1+d)^t} \quad \text{Fonction d'utilité intertemporelle} \quad (1.1)$$

Robert Solow a étudié ce modèle en 1956. Il a montré qu'à l'équilibre, le taux de croissance optimal de cette économie est indépendant des préférences des agents : il dépend uniquement du taux de croissance du facteur travail (ici pris au sens de travail efficace, i.e. qui intègre à la fois dynamique de la population et progrès technique). Par contre, moins les agents sont « impatients » et plus ils sont désireux d'accroître leur niveau de consommation, plus le chemin optimal sera capitaliste, et donc plus le taux d'épargne sera élevé avec corrélativement une productivité marginale du capital plus faible. Cet état d'équilibre n'est cependant atteint que lorsque le ratio capital sur travail atteint une valeur optimale.

Solow considère comme variable de commande le taux d'épargne. Il est équivalent de raisonner sur le taux d'actualisation, qui impose par définition le taux de rendement minimal à partir duquel un projet est mis en œuvre : la quantité d'épargne à mettre en œuvre s'en déduit automatiquement. Ce taux optimal s'identifie ainsi par définition à la productivité marginale du capital à l'optimum. Si nous notons r ce taux, sa valeur optimale dans le modèle de Solow est donnée par la formule suivante⁵ :

⁵ L'analyse formelle du modèle de Solow sera menée au chapitre 5, lorsque nous reprendrons en détail la discussion sur l'actualisation. Si la formule (1.2) semble par trop « sortir du chapeau », le lecteur pourra utilement la retrouver à l'aide du petit raisonnement suivant.

Supposons une économie dont le taux de croissance future est de $g\%$ par an, et dont les préférences sont données par la fonction de bien-être intertemporelle (1.1). De quel montant dc_1 cette société est-elle prête à diminuer sa consommation aujourd'hui pour obtenir un supplément de consommation dc_2 demain ? Pour qu'il y ait indifférence, il faut et il suffit que l'égalité ci-dessous soit vérifiée :

$$r = d + g \cdot n \quad \text{Formule de calcul du taux d'actualisation} \quad (1.2)$$

Dans cette formule, g représente le taux de croissance optimal de l'économie, et n est l'élasticité consommation (temporelle) de l'utilité marginale de la consommation donnée par :

$$n = - \frac{du'(c_t)/dt}{dc_t/dt} \frac{c_t}{u'(c_t)} \quad (1.3)$$

La formule (1.2) traduit le fait qu'il existe deux arguments principaux pour actualiser des flux monétaires futurs (Arrow, 1995). En premier lieu, si nous anticipons que nos descendants seront plus riches que nous, et si nous faisons l'hypothèse que l'utilité marginale de la consommation diminue avec le niveau de richesse, alors il est justifié d'actualiser pour tenir compte du fait qu'un franc de plus demain augmentera moins le bien-être de nos riches descendants que le même franc aujourd'hui. Ce terme est appelé « effet richesse ». En second lieu, il est justifié d'actualiser dans la mesure où les agents ont une préférence pour un revenu immédiat par rapport à un revenu différé. Le terme d , qui traduit cette préférence, est le taux d'escompte social ou taux de « préférence pure pour le présent ».

A ce stade de la discussion, les statuts logiques de chacun de ces deux termes apparaissent très différents. L'effet richesse est en effet défini à partir d'une évaluation du taux de croissance de la consommation de bien composite dans le futur (terme g) et d'une représentation des préférences des agents (terme n). Par conséquent, sa valeur ne peut être estimée indépendamment d'un jeu d'hypothèses portant sur l'évolution de l'économie et des comportements des agents. Ceci ne signifie certes pas que la valeur de ce terme soit exempte de controverses. Au contraire, les principaux scénarios de référence à long terme présentent des taux de croissance annuels moyens sur l'ensemble du siècle prochain qui s'échelonnent entre 1,0% et 3,0%⁶. Quant au terme n , le second rapport du GIEC (Arrow *et al.*, 1996a) rapporte deux études donnant des valeurs comprises entre 0,8 et 1,6. En combinant ces deux incertitudes, nous obtenons une fourchette de 0,8% à 4,8% pour le seul effet richesse. Ces incertitudes portent néanmoins sur des paramètres clairement identifiés.

Tout autre est le cas de la « préférence pure pour le présent ». Elle dérive en effet d'une fonction d'utilité intertemporelle dont la forme est fortement discutée dans la littérature (Rawls, 1971, Chichilnisky, 1996, Crooper et Laibson, 1999). Et même si nous acceptons pour le moment la fonction (1.1), la valeur du paramètre d reste fortement controversée. Certains auteurs défendent en effet l'idée selon laquelle le « taux de préférence pure pour le présent » devrait être fixé à une valeur nulle ou très faible afin de ne pas créer d'asymétrie de traitement entre la génération présente et les générations futures (Goodin, 1982, Broome, 1992, Cline, 1993). D'autres prétendent au contraire que le taux de « préférence pure pour le présent » doit être choisi positif et à une valeur relativement élevée, de 2% à 4% pour donner un ordre de grandeur⁷, afin de faire en sorte que les programmes de croissance obtenus en maximisant la fonction (1.1) ne génèrent pas d'efforts trop importants pour la première génération (Koopmans, 1965, Arrow, 1995).

$$u(c_1) - u(c_1 - dc_1) = \frac{1}{1+d} [u(c_2 + dc_2) - u(c_2)]$$

Au premier ordre, et donc en supposant simultanément que dc_1 est petit devant c_1 et que dc_2 est petit devant c_2 , l'égalité qui précède peut être ramenée à :

$$\frac{dc_2}{dc_1} \gg 1 + d - g \cdot \frac{c_1 \cdot u''(c_1)}{u'(c_1)}$$

Nous retrouvons ainsi que sacrifier dc_1 pour obtenir dc_2 est indifférent à ne rien faire pour un taux d'actualisation r vérifiant l'équation (1.2).

⁶ Le lecteur trouvera au chapitre 7 une analyse détaillée des principaux scénarios de référence à long terme.

⁷ L'estimation numérique la formule (1.2) conduit à une fourchette de taux d'actualisation allant de 0,8% à 9% environ, ce qui est particulièrement important. Une analyse des principaux modèles d'évaluation économique des politiques climatiques donne une fourchette effectivement utilisée de 1,5% à 6% (Toth, 1995), ce qui reste encore très important.

Si le débat sur l'arbitrage entre présent et futur est résumé par la discussion sur l'actualisation, c'est donc dans le choix du « taux de préférence pure pour le présent » qu'il se cristallise. Nous reviendrons au chapitre 5 sur les termes de ce débat complexe. A ce stade de la discussion, nous considérons simplement d comme une variable indépendante des hypothèses de base du modèle de Solow qui peut prendre toute valeur comprise entre 0% et 4%. S'agissant du paramètre critique pour l'arbitrage entre court terme et long terme, il nous faut en examiner numériquement les conséquences sur l'évaluation des politiques climatiques. C'est ce que nous nous proposons de faire dans les deux sections suivantes.

Nous devons cependant auparavant revenir sur la formule (1.2). Celle-ci découle cependant d'un modèle très simple dans lequel (i) l'agent représentatif conduit une optimisation intertemporelle jusqu'à la fin des temps et (ii) les institutions économiques sont suffisamment transparentes pour faire en sorte que la satisfaction des agents se réduise en fait à une question d'optimisation technique de la production (Solow, 1988). Nous devons donc examiner dans quelle mesure ces modifications du modèle conduisent à changer la nature de la discussion que nous venons de mener sur l'actualisation.

2.1.2. De l'actualisation dans des modèles plus réalistes

a) Agent vivant indéfiniment ou générations imbriquées ?

La première critique que Solow formule avec le recul à son propre modèle (Solow, 1988) est qu'il représente des agents (ou des dynasties) qui font leurs choix de consommation et d'investissement sur la base d'une optimisation à très long terme. Or selon certains auteurs, une telle présentation masque l'importance du legs d'une génération vers la suivante en tant que motivation principale de la transmission de la génération présente à la génération future. Ils proposent l'utilisation de modèles à générations imbriquées en lieu et place de modèles à agent vivant indéfiniment. Une comparaison rigoureuse du comportement des modèles à générations imbriquées et des modèles à individu vivant indéfiniment reste cependant à écrire (Toth, 1999). A notre connaissance, la plupart des contributions qui prétendent mettre en regard les avantages et les inconvénients des deux systèmes s'appuient sur des hypothèses par trop différentes pour pouvoir tirer des conclusions générales.

Suite aux travaux de Howard et Nordgaard (1993), Reyer Gerlagh (1999) fait ainsi apparaître à l'aide d'un modèle à générations imbriquées des taux d'intérêts non constants et nettement inférieurs aux taux d'actualisation couramment utilisés dans les modèles à agent vivant indéfiniment. Ce résultat dérive cependant de deux hypothèses centrales qui ne sont pas formulées dans les modèles classiques à agent vivant indéfiniment, à savoir d'une part une espérance de vie des agents qui s'allonge au fur et à mesure qu'ils deviennent plus riches, et d'autre part la mise en place d'un fonds intergénérationnel pour l'environnement. La présence de ces deux hypothèses fortes nous empêche de tirer des conclusions définitives quant à l'existence d'une différence de fond entre les résultats que donneraient un modèle à générations imbriquées et ceux donnés par les modèles classiques.

Les résultats de Stephan et Müller-Fürstenberger (1997) sont plus ambigus. La comparaison entre deux modèles, l'un à agent vivant indéfiniment avec un « taux de préférence pure pour le présent » nul, et l'autre à générations imbriquées, montre pour un même objectif climatique des trajectoires d'abattement plus douces dans le second cas que dans le premier. Le choix d'un « taux de préférence pure pour le présent » nul nous place néanmoins dans un cas très particulier. Les travaux d'Alan Manne (1999a) et de Stephan *et al.* (1997) tendent quant à eux à montrer que sous des hypothèses comparables, une représentation en termes de générations imbriquées ou d'agent vivant indéfiniment ne donnent pas des trajectoires sensiblement différentes. Il n'est donc pas possible, à notre connaissance, d'affirmer que les modèles à générations imbriquées donneraient des résultats fortement différents des modèles à agent vivant indéfiniment. A ce stade, leur avantage semble être simplement de permettre une représentation plus fine de certains mécanismes, comme l'allongement de la durée de la vie ou l'impact de la fiscalité sur l'héritage ou des politiques d'allocation vieillesse, toutes choses qui dépassent le cadre du présent travail.

b) Actualiser dans un système économique complexe

Dans la réalité, nous observons des taux de productivité marginales très différents selon les secteurs de l'économie. En outre, les taux d'intérêts observés sur les marchés financiers, et qui devraient être dans un monde de premier rang égaux au taux de productivité marginaux du capital⁸, se révèlent fortement différents. Le tableau 1.1 ci-dessous donne un aperçu de la diversité des taux de rendements moyens de différents types d'investissements publics et privés.

Type de placement	Période	Rendement réel (%)
<i>Pays industrialisés</i>		
Actions	1960-1984	5,4
Obligations	1960-1984	1,6
Capitaux non résidents	1975-1990	15,1
Bons du Trésor à court terme	1960-1990	0,3
<i>USA</i>		
Actions	1925-1992	6,5
Capital privé avant impôts	1963-1985	5,7
Capital industriel après impôts	1963-1985	5,7
Immobilier	1960-1984	5,5
Terre Agricole	1947-1984	5,5
Bons du Trésor	1926-1986	0,3
<i>Pays en voie de développement</i>		
Education primaire	diverses	26
Education supérieure	diverses	13

Table 1.1 : Taux de rendements estimés de différents placements financiers et investissements directs.
Source : Arrow et al. (1996a).

Dans ce contexte, le débat porte essentiellement sur la nature publique des investissements considérés. Certains auteurs défendent l'idée selon laquelle les institutions publiques devraient adopter un taux d'actualisation correspondant au rendement moyen des investissements privés (Birdsall et Steer, 1993, Weitzman, 1999) au motif que dans le cas contraire, l'État détournerait l'épargne des investissements les plus efficaces. Cette question constitue une pierre d'achoppement centrale de la discussion sur l'actualisation (Lind, 1982). Sans rentrer ici en détail dans une controverse particulièrement complexe⁹, nous ferons ici simplement deux remarques :

- En premier lieu, comme le fait remarquer Rabl (1995), il n'est pas cohérent de retenir un taux de croissance de long terme compris entre 1% et 3% et de choisir dans le même temps un taux d'actualisation très élevé pour des investissements publics dès lors que ceux-ci impliquent des volumes d'épargne importants. Soit le taux de croissance de long terme est sous-évalué, soit, plus sûrement, le volume d'investissements dont les rendements à long terme sont très élevés reste faible.
- En second lieu, le raisonnement qui précède suppose implicitement qu'investissements privés et investissements publics soient parfaitement substituables. Or la réalité est nettement plus complexe, et dépend en particulier de la nature des systèmes fiscaux en vigueur dans les différents pays (Stiglitz, 1982).

Par contre, le fait de retenir un taux d'actualisation *ad hoc* pour un type d'investissement public particulier, le changement climatique par exemple, apparaît comme une fausse solution. Elle crée pour

⁸ Notons que le modèle de Solow est une représentation exclusivement physique de l'économie dans laquelle la monnaie n'est pas nécessaire.

⁹ Le lecteur trouvera dans l'ouvrage collectif dirigé par Robert Lind (1982) un résumé à notre connaissance encore non dépassé de la discussion du choix du taux d'actualisation dans une économie de second rang. L'introduction de Lind lui-même, ainsi que les papiers de Kenneth Arrow et de Joseph Stiglitz constituent en particulier des textes de références.

le coup une asymétrie de traitement entre les différentes dépenses publiques. De plus, elle revient à traiter de manière non explicite des hypothèses formulées en réalité sur les rendements de ces investissements. Comme le dit Boiteux, « *le fait que tel investissement public soit réalisé implique que l'estimation faite, explicitement ou non, de la valeur des services attendus conduisait, ou aurait conduit, à une [valeur actualisée nette] positive.* » (p.120). Enoncé d'un point de vue positif, l'argument de Boiteux revient à dire qu'en situation d'incertitudes sur les bénéfices des politiques climatiques, il vaut mieux ajouter un terme *ad hoc* dans l'évaluation des dommages plutôt que de modifier arbitrairement le taux d'actualisation¹⁰.

En pratique, il n'est pas du tout évident de trancher ces questions, qui relèvent pour une bonne part de croyances sur le fonctionnement actuel du système économique¹¹. Même en restant dans le cadre restrictif d'un seul agent représentatif par génération que nous avons adopté pour ce chapitre, nous pourrions obtenir, si l'utilité est fonction de plusieurs biens, un taux d'actualisation propre à chacun de ces biens (Dasgupta et Goran-Mäler, 1999, Henry, 1997). Néanmoins, nous nous trouverions tout de même en présence de deux catégories de termes dans la formule permettant de calculer le taux d'actualisation : des termes qui dépendent directement d'une représentation de l'économie et des préférences, correspondant à l'effet richesse de la formule (1.2), et un terme de « préférence pure pour le présent » lié à la fonction de bien-être intertemporelle. Nous obtiendrions ainsi à nouveau des termes directement issus d'hypothèses sur le futur de l'économie et de jugements sur les préférences, et d'un terme dont la valeur est moins directement contrôlée par les hypothèses générales formulées sur les comportements, les technologies et les institutions. De ce point de vue, l'analyse de sensibilité à la « préférence pure pour le présent » que nous nous proposons de mener dans la suite dans le cadre n'est pas conceptuellement remise en cause.

3. STARTS : modèle d'optimisation intertemporelle des politiques de réduction des émissions de CO₂ fossiles

Nous consacrons cette seconde section à la présentation de STARTS¹², modèle d'optimisation intertemporelle des politiques de réduction des émissions de CO₂ fossiles en univers coûts avantages ou coûts efficacité. A chaque période, deux variables sont considérées : le taux de croissance d'une part et le niveau d'abattement par rapport à une trajectoire de référence de l'autre. Leur optimisation permet de maximiser la fonction de bien-être intertemporelle.

Les sections qui suivent s'attachent à décrire les différents modules constitutifs du modèle : module économique (section 3.1), module climatique (section 3.2) et objectif de maximisation (section 3.3). La section 3.4 présente enfin les procédures de calibration du modèle. Le lecteur trouvera à la page 51 un tableau récapitulatif des équations, variables et paramètres du modèle, ainsi que le code informatique complet en annexe 1.

¹⁰ Il existe une vaste littérature qui recommande l'utilisation d'un taux d'actualisation plus faible au nom de la défense de l'environnement pour les générations futures. La synthèse de Goodin (1982) nous semble toujours d'actualité. Le livre de Broome (1992) propose une analyse plus fouillée appliquée au cas du changement climatique. Pour ce qui est de la défense d'un taux d'actualisation unique, le lecteur trouvera plusieurs contributions en ce sens dans l'ouvrage collectif sur l'actualisation dirigé par Paul Portney et John Weyant (1999), par exemple les articles de Michael Weitzman ou de William Nordhaus.

¹¹ Cette opposition des visions de l'économie transparaît clairement dans la controverse entre Cline d'une part, Birdsall et Steer d'autre part que nous avons citée au début de cette section.

¹² Pour « *Sectoral Trajectories with Adaptation and Response Turnover of Stocks* » - Trajectoires Sectorielles avec Adaptation et Réponse de la Rotation du Capital. Ce patronyme, pour lequel nous remercions Michael Grubb, pourra surprendre car ce modèle représente une économie à un seul secteur agrégé. En réalité, le modèle STARTS a initialement été développé avec deux secteurs (Hourcade *et al.*, 1996b, Lecocq *et al.*, 1998, voir aussi le chapitre 6 du présent travail), puis réduit pour examiner les questions d'actualisation. C'est cette seconde version que nous présentons ici en premier.

3.1. Module économique

Commençons par préciser les notations. Le temps est représenté dans tout ce qui suit de manière discrète. La période totale d'étude est ainsi divisée en $T+1$ périodes numérotées de 0 à T et de longueur D années chacune. La première période, numérotée 0, commence en 2000, qui sera la date initiale de notre modèle. Nous choisirons dans les applications numériques $D = 10$ ans, mais sauf indication contraire, les grandeurs (paramètres ou variables) dépendant du temps seront toujours mesurées de façon annuelle. Par convention, et sauf indication contraire à nouveau, les équations dépendant du temps sont écrites pour toutes les périodes comprises entre 0 et T .

3.1.1. Modèle de croissance

a) Modèle de base

Le modèle STARTS représente l'économie sous la forme d'un modèle de croissance à la Ramsey-Solow (Ramsey, 1928, Solow, 1956). La production globale d'un unique bien composite Y résulte par une fonction de production de Cobb-Douglas de la combinaison des deux facteurs travail L et capital K (équation 1.4) :

- Le travail L , donné de façon exogène, caractérise le nombre d'heures de travail efficaces et intègre à la fois dynamique de la population et progrès technique, ici considéré comme neutre au sens de Hicks.
- Le capital K recouvre l'ensemble du matériel productif de l'économie (machines, usines, infrastructures, etc.). Sa valeur initiale K_0 est fixée, mais son évolution est endogène à la résolution du modèle.

La production du bien composite est répartie entre consommation C , investissement I et dépenses de réduction des émissions Ca (équation 1.5). L'investissement permet d'augmenter le stock de capital selon la dynamique d'accumulation décrite par l'équation (1.6), dans laquelle h représente le taux de dépréciation annuel du capital.

$$Y_t = K_t^a L_t^{1-a} \quad \text{Fonction de production} \quad (1.4)$$

$$Y_t = C_t + I_t + Ca_t \quad \text{Répartition de la production} \quad (1.5)$$

$$K_{t+1} = K_t + D.[I_t - hK_t] \quad \text{Accumulation du capital} \quad (1.6)$$

b) Contraintes sur les variables

Les valeurs de la consommation, de l'investissement et du capital sont contraintes par les trois équations suivantes :

$$C_t > 0 \quad \text{Consommation strictement positive} \quad (1.7)$$

$$I_t \geq 0 \quad \text{Il est impossible de « manger » du capital} \quad (1.8)$$

$$K_t \geq 0 \quad \text{Le capital ne peut être négatif} \quad (1.9)$$

Le lecteur vérifiera sans peine que ce jeu de contraintes est suffisant pour assurer à la fois que la production totale à chaque période Y_t soit positive et que les coûts d'abattement soient inférieurs à cette production.

c) Condition de transversalité

Dans les articles de Ramsey et de Solow, l'horizon de calcul est poussé jusqu'à l'infini. L'implémentation numérique d'un tel modèle nécessite de travailler sur un nombre fini de périodes, et pose ainsi un problème bien connu de condition aux limites. Le modèle a en effet intérêt à sous investir au cours des dernières périodes, pour terminer à l'horizon de calcul avec un capital nul : la consommation au-delà de la période terminale n'est en effet pas prise en compte.

La technique habituellement utilisée par les modélisateurs consiste à introduire une condition de transversalité *ad hoc* afin de limiter la disparition du capital à très long terme (Manne, 1986). Cependant, sauf à connaître *ex ante* la nature du programme de croissance optimale du modèle, aucune de ces techniques ne permet de reproduire exactement ce qui se passerait avec un horizon infini. Par prudence, la plupart des modélisateurs intègrent donc un horizon de calcul qui dépasse largement l'horizon d'analyse requis. Nous adopterons ici cette démarche en choisissant un horizon de calcul de 30 périodes de 10 ans alors que nous retiendrons uniquement les résultats sur 10 premières périodes.

3.1.2. Emissions de CO₂ fossile avant abattement

Les émissions de CO₂ fossiles résultent de l'activité des différents secteurs productifs de l'économie, et en particulier des transports, du secteur énergétique et de l'industrie. A un niveau aussi agrégé, nous choisissons de faire dépendre les émissions fossiles de CO₂ annuelles (notées $\bar{E}_t$) directement du niveau de la production agrégée. Nous postulons une relation de la forme (1.10) suivante, dans laquelle le taux de croissance moyen des émissions dépend à chaque instant du taux de croissance moyen de la production, et où l'indice S_t représente la tendance autonome à la baisse des émissions par unité de bien produit qui résulte à la fois de l'amélioration de l'efficacité énergétique et de la diminution de l'intensité carbone de l'économie.

$$\frac{1}{t} \ln \frac{\bar{E}_t}{\bar{E}_0} = \ln[1 + S_t] + \frac{1}{t} \ln \frac{Y_t}{Y_0} \quad \text{Emissions fossiles de CO}_2 \text{ avant abattement} \quad (1.10)$$

3.1.3. Coûts de réduction des émissions

Après le niveau de l'investissement I , le modèle a pour seconde variable de décision à chaque période l'effort de réduction des émissions. Cette grandeur, notée A_t représente la quantité d'émissions fossiles « évitées » chaque année par rapport aux émissions de base $\bar{E}_t$. Les valeurs prises par cette variable vérifient donc naturellement les deux équations suivantes :

$$A_t \geq 0 \quad \text{Pas d'abattement négatif} \quad (1.11)$$

$$A_t \leq \bar{E}_t \quad \text{Pas d'abattement au-delà de la référence} \quad (1.12)$$

a) Coûts marginaux de réduction des émissions techniques

Comme nous l'avons vu en introduction, les modèles d'évaluation économique des politiques climatiques peuvent être répartis en deux grandes catégories : les architectures « *top-down* » évaluent les coûts à partir d'une analyse économétrique, les architectures « *bottom-up* » fondent au contraire leurs estimations sur une analyse technico-économique détaillée¹³ (Hourcade *et al.*, 1996c). Cette typologie reste pertinente pour des modèles très agrégés tels que STARTS, mais sous une forme dégradée. Qu'elle représente des coûts techniques ou des coûts macroéconomiques, la fonction de coûts d'un tel modèle se présente en effet sous la forme d'une relation simple entre la variable

¹³ Parmi les principaux modèles de type « *bottom-up* », citons MERGE (Manne et Richels, 1992), SGM (Edmonds *et al.*, 1991, Fischer-Vanden *et al.*, 1993), EPPA (Prinn *et al.*, 1996), POLES (Criqui, 1996, Criqui *et al.*, 1999), PRIMES (Capros, 1998) ou MARKAL (Loulou *et al.*, 1997). Le principal modèle Top-Down utilisé aujourd'hui est G-Cubed (McKibbin *et al.*, 1998).

contrôlant le niveau d'abattement agrégé (en l'occurrence A_t) d'une part et les coûts (Ca_t) de l'autre. L'interprétation « *bottom-up* » ou « *top-down* » de cette fonction dépend essentiellement des données sur lesquelles elle est calibrée.

Le modèle DICE (Nordhaus, 1992a et b) comprend une fonction de coûts macroéconomiques qui affecte directement la fonction de production. Dans DIAM (Grubb *et al.*, 1995), les coûts de réduction des émissions techniques sont exprimés comme une fonction quadratique du niveau d'abattement. Nous décidons de même de choisir pour STARTS une fonction de coûts techniques de réduction des émissions dont nous postulons *a priori* que la forme est donnée par l'équation (1.13) ci-dessous.

$$CT_t = \bar{CT} l_t \frac{A_t^2}{E_t} \quad \text{Coûts techniques marginaux de réduction des émissions} \quad (1.13)$$

Choisir des coûts marginaux de réduction des émissions convexes en fonction du pourcentage d'abattement est conforme aux différents dires d'experts et aux résultats des principaux modèles technico-économiques¹⁴. Le terme $\bar{CT}$ représente le coût marginal à la date 0 de la technologie ultime permettant de réduire de 100% les émissions fossiles de CO₂. L'indice l_t représente la diminution des coûts marginaux de réduction des émissions induites par le progrès technique autonome.

Conformément à la discussion sur les coûts menée en introduction, nous n'introduisons ici aucun potentiel sans regret. Nous intégrons donc la relation (1.13) en posant $CT(0) = 0$. Nous n'introduisons en outre aucun terme de progrès technique induit, qui ferait que le terme de progrès technique l dépende uniquement du temps t et non de l'histoire des réductions d'émissions. Les coûts techniques totaux de réduction des émissions sont alors déduits de (1.13) par intégration sur le niveau d'abattement A .

$$CT_t = \int_0^A CT'_t(a).da = \frac{1}{3} A_t \bar{CT} l_t \frac{A_t^2}{E_t} \quad \text{Coûts techniques totaux d'abattement} \quad (1.14)$$

En intégrant sur l'ensemble de l'intervalle $[0, A_t]$ et non sur la variation d'abattement $[A_{t-1}, A_t]$, nous faisons l'hypothèse implicite selon laquelle les coûts techniques de réduction des émissions que nous représentons sont essentiellement des coûts permanents et non des coûts transitoires liés par exemple à un prix d'achat de la technologie plus élevé.

b) Pénalité d'accélération

Nous complétons ici les coûts techniques directs de la réduction des émissions par un facteur dit d'accélération permettant de prendre en compte le fait que l'inertie du capital et, plus globalement, l'inertie de l'ensemble du système socio-économique rendent plus difficile toute diminution trop rapide des émissions de CO₂. Ce facteur permet de résumer trois grands mécanismes économiques qui participent à augmenter l'inertie du système :

- Tout d'abord, à partir d'un certain seuil dépendant de la composition du capital productif, réduire les émissions rapidement implique de remplacer de manière prématurée du capital existant. L'amortissement anticipé s'ajoute alors aux coûts d'achats et d'exploitation additionnels des nouvelles technologies. Nous reviendrons en détail sur ce point au chapitre 6.
- En second lieu, l'offre de travail n'est pas parfaitement fluide, que ce soit sur le plan des qualifications que sur le plan géographique. Une telle approximation est certainement possible dans un modèle agrégé destiné à étudier des chemins de croissance réguliers, mais ne l'est plus

¹⁴ De telles courbes apparaissent ainsi dans le modèle EPPA du MIT (Ellerman et Decaux, 1998), POLES de l'IEPE (Criqui, 1996, Criqui *et al.*, 1999) ou encore SGM.

dès lors que sont envisagées les modifications brutales des systèmes de production qui pourraient résulter de politiques de réduction des émissions.

- En troisième lieu, il est très coûteux en termes économiques comme sociaux de démanteler des systèmes socio-économiques organisés autour des industries émettrices de carbone (par exemple les régions qui dépendent du charbon en Allemagne ou en Inde, ou le secteur du transport routier en France).

Il existe de nombreuses manières de traiter l'inertie à un niveau agrégé. Dans URGENCE (Hourcade et Chapuis, 1995), l'inertie intervient comme un multiplicateur fonction de la vitesse de rotation du capital. Dans Hammit *et al.* (1992), elle est traitée de manière endogène grâce à l'utilisation de courbes logistiques de pénétration du changement technique. Toth *et al.* (1997) introduisent une borne supérieure arbitraire au taux de réduction des émissions de la forme $\frac{E'_t}{E_t} \leq 10\%$. DIAM (Grubb *et al.*, 1995) endogénéise l'inertie de manière telle que les coûts permanents et les coûts d'ajustement soient séparables : la fonction de coûts de réduction des émissions est additive et l'inertie du système est définie par le poids des coûts d'ajustement sur l'ensemble des coûts de réduction des émissions. De ce fait, il est possible de représenter des coûts de transition élevés même si les coûts incrémentaux des techniques non émettrices dans la nouvelle trajectoire stabilisée sont nuls ou même négatifs.

Nous choisissons de représenter ici l'inertie en introduisant un facteur d'accélération g qui multiplie les coûts de réduction des émissions : ce facteur vaut 1 lorsque la vitesse des abattements est inférieure à une valeur limite t donnée, et progresse linéairement lorsque cette vitesse dépasse t (équation 1.15). Le terme t , qui a la dimension d'une quantité d'émissions de CO₂ annuelle traduit l'inertie globale du système économique.

$$g(A_t, A_{t-1}) = \begin{cases} 1 & \text{si } \frac{A_t - A_{t-1}}{E_t} \leq 1 \\ \frac{A_t - A_{t-1}}{E_t} & \text{sinon} \end{cases} \quad (1.15)$$

Les coûts totaux de réduction des émissions du modèle STARTS Ca_t sont donc finalement donnés par la formule intégrée :

$$Ca_t = \frac{1}{3} \cdot A_t \cdot \bar{CT} \cdot \frac{A_t}{E_t} \cdot g(A_t, A_{t-1}) \quad \text{Coûts d'abattement totaux} \quad (1.16)$$

3.2. Module climatique

3.2.1. Cycle du carbone

Nous retenons dans ce modèle le cycle du carbone développé initialement par William Nordhaus pour le modèle DICE (1992a et b). Dans ce modèle simplifié, une fraction des émissions anthropiques annuelles s'ajoute à la concentration atmosphérique. En outre, une fraction du carbone excédentaire par rapport à un hypothétique état d'équilibre préindustriel s'échappe chaque année vers l'océan. Ce cycle est représenté par l'équation aux différences (1.17), dans laquelle M_t est la concentration atmosphérique en CO₂ (mesurée en parties par millions, 1 ppm = 0,47 GtC), ED_t sont les émissions de CO₂ non fossiles données de manière exogène, et M_∞ le niveau de concentration d'équilibre. Le paramètre a représente la fraction des émissions stockées dans l'atmosphère, alors que b , qui a la dimension de l'inverse d'un temps, représente le temps caractéristique de résidence du carbone dans l'atmosphère. Nordhaus paramètre le modèle avec $a = 0,38$ et $b = 0,083$

$$M_{t+1} = M_t + D \cdot [a \cdot (E_t + ED_t - A_t) - b \cdot (M_t - M_\infty)] \quad \text{Dynamique de la concentration en CO}_2 \quad (1.17)$$

Joos *et al.* (1999) soulignent cependant que le cycle du carbone de Nordhaus ne représente pas correctement la dynamique du carbone entre océan et atmosphère. Selon leurs simulations, ce modèle a en particulier tendance, par rapport aux modèles climatiques, à fortement sous-évaluer la durée de vie du carbone dans l'atmosphère dans la mesure où il ne tient pas compte de l'équilibre des pressions partielles en CO₂ entre atmosphère et océans. Joos *et al.* suggèrent donc d'utiliser une meilleure approximation des modèles du cycle du carbone détaillés en introduisant une fonction de réponse qui pourra être convoluée avec n'importe quelle trajectoire d'émissions. Cette solution avait déjà été explorée, mais sous une forme plus simple, par Ha-Duong *et al.* (1997).

En outre, le modèle de Nordhaus ne prend pas en compte l'impact de l'augmentation de la concentration atmosphérique en CO₂ sur la fixation de carbone par les plantes lors de la photosynthèse. Svirezhev *et al.* (1999) proposent d'inclure une telle fonction. Le module climatique actuellement en cours de développement au CIREN en collaboration avec l'IPSL devrait en outre inclure des fonctions de réponse permettant de donner les profils d'émissions dues à la déforestation, à la reforestation et à la culture de biocarburants¹⁵.

Ces développements sont malheureusement intervenus trop tardivement pour que nous ayons le temps de les intégrer dans les différentes versions du modèle STARTS. La seule alternative disponible lors de la création du modèle, à savoir la fonction de réponse de Ha-Duong *et al.* (1997), ne présentait pas de différences de comportement significatives avec le modèle de Nordhaus. Nous prenons donc le parti d'utiliser quand même le cycle du carbone de Nordhaus malgré ses limitations évidentes et nous mettons en tête de l'agenda de recherche futur la formulation d'une nouvelle version basée sur un cycle du carbone plus réaliste.

3.2.2. Traitement des dommages du changement climatique

a) Coûts efficacité : plafond de concentrations

Nous traduisons numériquement le raisonnement coûts efficacité en introduisant une contrainte climatique sous la forme d'un plafond de concentration $\bar{M}$ à ne pas dépasser. Conformément à la lettre de la Convention Cadre sur le Changement Climatique, nous supposons que ce plafond est choisi de telle sorte qu'il évite des dommages trop importants sur les écosystèmes et sur les économies. De fait, nous n'introduisons pas de fonction dommages en coûts efficacité :

$$M_t \leq \bar{M} \quad \forall t \in \{0, \dots, T\} \quad \text{Contrainte sur la concentration} \quad (1.18)$$

b) Coûts avantages : fonction de dommages

La plupart des modèles climatiques estiment les dommages mondiaux agrégés monétaires et non monétaires comme une fraction du PIB mondial. Ces dommages sont la plupart du temps représentés par une fonction puissance de la température moyenne à la surface du sol (Tol et Fankhauser, 1998), avec un exposant variant en général de 1 à 3. Les modèles sont ensuite calibrés pour passer par un point de référence, donné en général comme une perte de PIB mondial obtenue à une hausse de la température de 2,5°C correspondant à un doublement de la concentration atmosphérique en CO₂ par rapport à l'ère préindustrielle.

Des analyses plus fines sur les dommages suggèrent que cette représentation agrégée n'est pas pertinente pour représenter la somme de dynamiques sectorielles et régionales très diverses, conduisant pour certaines régions et pour certains secteurs à des dommages négatifs (Tol, 1999a et b, Mendelsohn et Schlesinger, 1999). Cette critique nous semble cependant de second ordre par rapport au fait que les fonctions de dommages couramment utilisées présentent dans tous les cas des

¹⁵ Communication personnelle de Philippe Ambrosi et de Philippe Ciais.

dynamiques relativement « lisses ». Or il n'est pas possible d'exclure aujourd'hui la possibilité de « surprises climatiques » marquées par une augmentation brutale des dommages.

En premier lieu, le système climatique peut évoluer de manière fortement non linéaire avec les émissions de gaz à effet de serre. L'effet le plus connu est le possible ralentissement voir l'arrêt complet de la circulation thermohaline dans l'Océan Atlantique Nord (Broecker, 1997) qui pourrait ainsi entraîner une modification drastique du climat de l'Europe de l'Ouest. La fréquence accrue d'événements de type El Niño, des modifications importantes des régimes de moussons ou, plus généralement, toute augmentation de la variabilité climatique pourraient se traduire au-delà d'un certain seuil par des conséquences très importantes sur les économies.

En second lieu, et même si le changement climatique se révèle suivre une dynamique relativement « douce », les dommages sur les économies peuvent s'avérer fortement non linéaires. Une fréquence accrue d'événements climatiques extrêmes pourrait entraîner à la longue des chocs non négligeables sur les économies. Le seuil des besoins alimentaires minimaux constitue une autre limite critique : si l'agriculture se trouve ainsi trop affectée dans les pays en voie de développement, une forte pression migratoire pourrait se développer (Parry *et al.*, 1999). Enfin, sans même imaginer de dommages économiques très importants, l'évaluation du risque climatique par la population peut varier de manière très brutale et très importante¹⁶.

Nous nous proposons donc d'adopter dans ce travail deux représentations qualitativement très différentes des dommages globaux du changement climatique.

- La première, linéaire, suppose que les dommages croîtront de manière régulière avec la concentration atmosphérique en CO₂. Nous faisons ici l'hypothèse que le climat évoluera de manière globalement synchrone avec la concentration atmosphérique en gaz à effet de serre, et que si des événements catastrophiques se produisent, les sociétés seront capables de les amortir pour faire en sorte que les dommages continuent à progresser à un rythme comparable à celui de la concentration.
- La seconde, exponentielle, suppose au contraire que, soit du fait d'une non linéarité climatique importante, soit du fait d'une incapacité de nos sociétés à s'adapter rapidement aux changements climatiques, les dommages du changement climatique progressent de manière explosive dès que la concentration en CO₂ dépasse un certain seuil.

D'un point de vue mathématique, nous traduisons ces deux hypothèses de la manière suivante. Les dommages notés D_t sont représentés comme une perte d'une fraction de la consommation finale de l'agent représentatif. Ce terme peut être interprété comme une perte de bien composite liée au réchauffement du changement climatique, ou comme la fraction de la consommation allouée à l'adaptation pour de conserver intact les facteurs de production capital et travail. Les dommages sont supposés dépendre directement de la concentration selon les deux équations suivantes :

$$D_t = \begin{cases} d_{2x} \frac{M_t - M_0}{2M_{\infty} - M_0} & \text{si } M_t \geq M_0 \\ 0 & \text{sinon} \end{cases} \quad \text{Dommages linéaires} \quad (1.19)$$

¹⁶ La crise des pluies acides (Hourcade *et al.*, 1992b) ou plus près de nous la crise de la vache folle ont montré à quel point les questions scientifiquement controversées pouvaient conduire à des prises de consciences radicales et brutales de la part de l'opinion publique. Le regain d'intérêt médiatique observé pour le changement climatique du moins de janvier 2000 à la suite des tempêtes de Noël témoigne, quoi qu'avec une ampleur plus faible, d'un phénomène similaire.

$$D_t = \begin{cases} e^{-\left(\frac{M_t - M_{catas}}{n}\right)^2} & \text{si } M_t \geq M_{catas} \\ 1 & \text{sinon} \end{cases} \quad \text{Dommages explosifs} \quad (1.20)$$

Dans le cas linéaire (1.19), le paramètre d_{2x} représente les dommages occasionnés par un doublement de la concentration atmosphérique en CO_2 par rapport à la concentration préindustrielle. Dans l'équation (1.20), le paramètre M_{catas} représente un seuil en concentration au-delà duquel l'économie s'effondre (figure 1.1). Le paramètre n contrôle la concentration plancher à partir de laquelle les dommages cessent d'être négligeables.

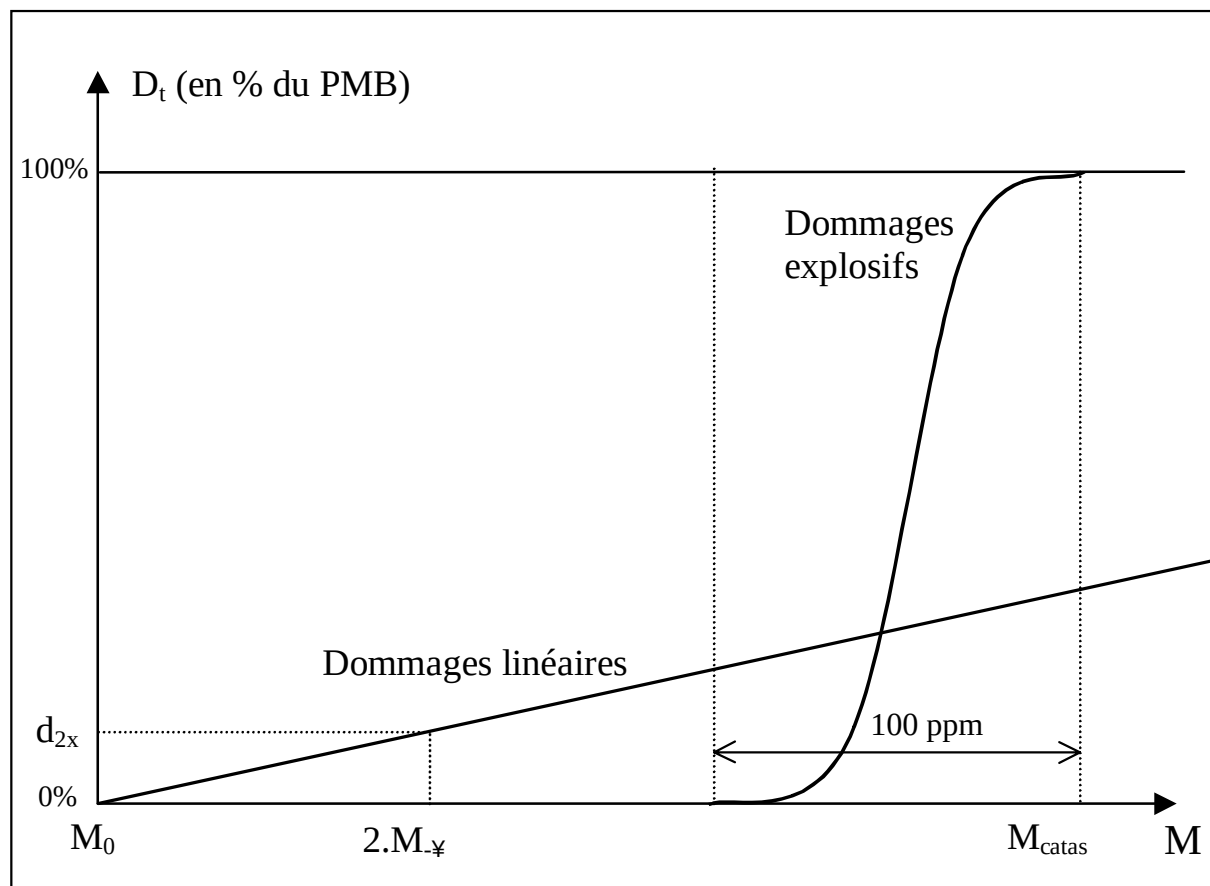


Figure 1.1 : Représentation des fonctions de dommages linéaires et explosifs retenues dans STARTS (en % du produit mondial brut en fonction du niveau de concentration atmosphérique en CO_2). Le fait que le niveau de catastrophe soit plus élevé que le niveau $2xM_{¥}$ est retenu ici simplement pour rendre la figure plus lisible.

3.3. Objectif de maximisation

D'un point de vue formel, le modèle STARTS s'articule autour de deux variables de commandes I et A , deux variables d'état M et K et quatre variables auxiliaires permettant de faciliter la lecture du modèle Y , C , Ca et D ¹⁷. Les équations (1.4) à (1.17), auxquelles il faut ajouter l'un des trois traitements des dommages possibles (1.18), (1.19) ou (1.20) ainsi que les états initiaux (K_0 , M_0) forment ainsi un système dynamique dont il est possible de décrire l'ensemble des commandes

¹⁷ D'un point de vue mathématique pur, STARTS comprend en réalité trois variables d'état : M , K et A et deux variables de commande I et u , où l'on pose $A'(t) = u$. Le niveau d'abattement A est formellement un état du système commandé par la dérivée du niveau d'abattement $A'(t)$ (Cohen G., Cohen de Lara M., comm. pers., 12/1999).

admissibles (I_t, A_t) , c'est-à-dire l'ensemble des commandes qui génèrent des solutions compatibles avec ces équations.

Il nous faut maintenant un critère représentant les préférences des agents et nous permettant de choisir une trajectoire particulière au sein de cet ensemble. Nous introduisons ainsi une fonction de bien-être sociale intertemporelle W qui traduit les préférences des agents entre plans de consommation. Par définition de W , le plan de consommation $\{C_0, \dots, C_T\}$ sera préféré au plan de consommation $\{C'_0, \dots, C'_T\}$ si et seulement si $W(C_0, \dots, C_T)$ est supérieur à $W(C'_0, \dots, C'_T)$. L'objectif du modèle est alors de trouver la trajectoire de croissance du modèle qui maximise le critère W .

La forme de la fonction d'utilité intertemporelle à employer pour les problèmes d'environnement à long terme est fortement discutée parmi les économistes. Outre la question de la « préférence pure pour le présent » dont nous avons déjà parlé dans la section précédente, le critère utilitariste présenté ci-dessus fait lui-même l'objet de controverses sérieuses. Pour ne pas multiplier les cas de figures possibles, nous nous en tiendrons néanmoins à cette fonction de bien-être intertemporelle particulière en faisant par contre varier largement, comme nous l'avons annoncé plus haut, le « taux de préférence pure pour le présent ». Le modèle se résout donc en maximisant le critère suivant :

$$\text{Max}_{I_t, A_t} W = \sum_{t=0}^T \frac{\ln[C_t \cdot (1-D_t)]}{(1+d)^{td}} \quad \text{Fonction de bien-être intertemporelle} \quad (1.21)$$

3.4. Calibration

La calibration du modèle STARTS comporte deux parties indépendantes. La première consiste à choisir les paramètres économiques de telle sorte que s'il n'y avait pas du tout d'externalité climatique, la maximisation de (1.21) donne une trajectoire de croissance à taux g constant d'ici à 2100. La seconde consiste à calibrer les fonctions de coûts de réduction des émissions et les différentes fonction de dommage que nous sommes susceptibles d'employer.

3.4.1. Croissance de référence

Nous choisissons de calibrer STARTS sur la base du scénario IS92a de l'IPCC (Leggett *et al.*, 1992¹⁸). Nous obtenons ainsi les valeurs initiales des paramètres du modèle économique (1.4-1.6) ainsi que les caractéristiques de l'élasticité production des émissions de CO₂ fossiles (1.10). Conformément à ce que nous avons annoncé à la fin de la première section, nous testerons ensuite différents « taux de préférence pure pour le présent », qui se traduiront par différents taux de croissance et donc par différentes trajectoires d'émissions.

Ainsi, le scénario de référence en termes de croissance et d'émissions change en fonction des hypothèses formulées sur le taux d'actualisation pour conserver la cohérence d'ensemble du modèle économique. Le scénario IS92a n'est donc pas ici une trajectoire de référence au sens où ce terme est couramment employé dans la littérature sur le changement climatique, mais simplement une base pour la calibration du modèle.

a) Facteurs de production

Nous calibrons le modèle de croissance hors contrainte climatique en supposant que l'économie se trouve sur un chemin de croissance stable à un taux annuel moyen de 2%. La théorie de la croissance nous enseigne que, pour que le modèle de Solow ait une solution optimale à taux de croissance g constant, il suffit d'une part que le travail augmente au taux g et d'autre part que le

¹⁸ La description chiffrée du scénario IS92a provient de la base de donnée de scénarios rassemblée par Morita et Lee en 1997.

Chapitre 2 Figures logiques de la décision sous incertitudes

Dans le modèle STARTS que nous avons construit au chapitre précédent, nous avons fait comme si toutes les incertitudes relatives au changement climatique avaient tout à coup été levées. STARTS représente en effet un monde dans lequel le fonctionnement du système climatique, ainsi que les impacts que son évolution peut avoir sur les économies sont parfaitement connus. De même, nous connaissons autant la trajectoire future de l'économie que ses possibilités d'adaptation au changement climatique ou ses capacités de réduction des émissions de GES. Pour calculer la politique climatique la plus efficace pour le bien-être collectif, il ne reste plus dans cet univers Laplacien qu'à égaliser mécaniquement les dommages marginaux du changement climatique avec les coûts marginaux de la protection du climat. Le dessin des politiques climatiques se réduit à un problème, certes complexe, de pure balistique.

Nous commençons dans ce chapitre à nous éloigner de cette métaphore. Nous avons abondamment souligné dans l'introduction que nous sommes loin de posséder une information parfaite. Chacun des maillons de la chaîne qui relie les émissions de GES aux impacts du changement climatique est en effet fortement controversé, tout comme la nature de l'évolution future des économies, ou encore la capacité de celles-ci à réduire leurs émissions de gaz à effet de serre. La majeure partie de nos actions individuelles et collectives sont certes décidées en information imparfaite, mais la combinaison d'un horizon de très long terme et de ces incertitudes font du changement climatique un cas extrême.

Pourtant, malgré les incertitudes scientifiques, malgré l'absence des générations futures à la table de négociation, malgré le fait que le réchauffement climatique reste aujourd'hui une « chimère » dont nous n'avons nulle expérience tangible, il faut aujourd'hui prendre une décision. Dans un contexte aussi complexe, il est d'autant plus remarquable que les économistes du Groupement Intergouvernemental pour l'Etude du Climat se soient mis d'accord pour recommander l'emploi d'un schéma de décision séquentiel (Arrow *et al.*, 1996b). Ce concept recouvre en réalité trois éléments bien distincts :

- Un calendrier des décisions prenant en compte le fait que de nouvelles informations sur le changement climatique sont susceptibles d'arriver dans le futur. Comme il ne nous est pas possible d'accélérer la vitesse d'acquisition de cette information, la décision devient naturellement « séquentielle » : à chaque étape, l'information supplémentaire qui nous est communiquée nous permet de réviser nos choix en meilleure connaissance de cause.
- Un changement de perspective : seule la première étape de la décision et non la totalité de la trajectoire d'action compte pour le décideur aujourd'hui. Nous verrons pourtant au chapitre 3 que ce rappel de pur bon sens a en fait des conséquences profondes sur la prise en compte des incertitudes.
- Une indication sur la démarche à suivre pour choisir les politiques de première étape : « *The objective of the first step of the decision sequence is to put the society as far as possible in the position to postpone technological or institutional "lock-in" and to use the extra negotiation time to increase options and reach wider consensus on how to approach the more difficult long-term decisions.* » (Arrow *et al.*, 1996b, p.71).

La « décision séquentielle » proposée par le GIEC articule donc trois notions fondamentales : l'incertitude, l'information croissante et la « préférence pour la flexibilité ». Si les deux premières sont relativement naturelles, la troisième est par contre beaucoup plus ambiguë. En effet, l'identification des « lock-in » technologiques et institutionnels est difficile. Leur évaluation dépend en effet des représentations de l'inertie et de l'adaptabilité des systèmes technico-économiques, ainsi que des

croyances sur la nature et le rythme du progrès technique futur¹. En second lieu, la simple inertie du capital nous force à chaque instant à prendre des décisions irréversibles, au moins à l'échelle de la première période de la décision. Se situer « loin » de ces impasses n'est donc pas évident. En troisième lieu, se placer « le plus loin possible » de ces culs-de-sac peut s'interpréter de manière maximaliste comme faire tout ce qui est en notre pouvoir techniquement pour les éviter tous, ou de manière plus modeste comme faire tout ce qui est possible compte tenu des autres contraintes économiques pour nous en tenir éloignés².

Pourtant, étant donné que nous sommes susceptibles d'obtenir plus d'information dans le futur, éviter de nous lier les mains apparaît comme un objectif assez naturel. Par ailleurs, les expériences numériques que nous avons menées au chapitre précédent ont souligné toute l'importance de l'inertie du système technico-économique pour l'évaluation des politiques climatiques. A ce stade de la discussion, nous sentons donc bien qu'un aspect important de la discussion sur la distribution temporelle des coûts des politiques climatiques se dissimule derrière la notion de flexibilité. Tout l'objectif de ce chapitre est donc de mieux comprendre la nature de la « préférence pour la flexibilité » évoquée par le GIEC. Il s'agit non seulement d'en comprendre le sens, mais aussi d'en produire une traduction analytique susceptible d'être intégrée à un modèle numérique d'évaluation des politiques climatiques.

Pour ce faire, nous commencerons par examiner ce qui nous apparaît le plus familier dans la décision séquentielle, à savoir la question de l'incertitude et de l'information croissante. La première section sera donc consacrée aux des critères disponibles pour représenter numériquement la prise de décision en univers risqué, c'est-à-dire dans lequel les probabilités d'occurrence des états du monde futurs sont connues *ex ante*. Nous passerons ensuite dans la seconde section à un univers incertain, c'est-à-dire dans lequel ces probabilités sont inconnues. A l'issue de cette discussion, et malgré leurs limites respectives, les critères de maximisation de l'utilité espérée (respectivement de maximisation de l'utilité subjective espérée) nous apparaîtront comme les mieux à même pour représenter des décisions successives sous risques ou sous incertitudes.

Forts de ces informations, nous nous tournerons enfin vers la « préférence pour la flexibilité ». Notre question sera alors de savoir s'il faut rajouter un élément aux critères de décision que nous avons obtenu précédemment pour traduire correctement ce que nous pouvons raisonnablement définir comme la « préférence pour la flexibilité ». Nous verrons en fait qu'un tel ajout n'est pas nécessaire, et que l'utilisation intelligente des critères définis précédemment suffit à faire naturellement apparaître une prime à la flexibilité. Nous illustrerons enfin ce propos avec un exemple directement tiré du débat sur le changement climatique³.

¹ Nous reviendrons plus largement au chapitre 6 sur cette question. Par ailleurs, le lecteur trouvera d'amples développements sur cette question dans les travaux menés au CIREN depuis 1995 Hourcade et Chapuis (1995), Hourcade *et al.* (1996b), Ha-Duong *et al.* (1997), Hourcade (1997), Hourcade (1998).

² Le « principe de préférence pour la flexibilité » développé par le GIEC présente ainsi une évidente filiation avec le principe de précaution. Au-delà des nuances sémantiques se trouve en effet articulé le même jeu de questions : quelle est la nature exacte des contraintes environnementales ou de santé publique mises en avant ? Peut-on les satisfaire toutes ou, dans le cas contraire, comment choisir laquelle transgresser ? Enfin, la satisfaction des contraintes est-elle un impératif absolu ou peut-elle être évaluée au regard d'autres objectifs de politiques publiques, par exemple de développement économique (Godard, 1997, 1999) ?

³ Ce chapitre dans son ensemble doit beaucoup aux deux premiers chapitres de la thèse de Thierry Chapuis (1996) et au *Cours de théorie microéconomique* de Jean-Jacques Laffont (1985). Nous remercions Minh Ha-Duong pour la relecture attentive et pertinente qu'il en a faite.

1. De la décision séquentielle en univers risqué

Depuis l'article fondateur de Knight (1921), un problème de décision est dit en présence de risques si les résultats des différentes actions possibles sont conditionnels à la réalisation d'états de la nature aléatoires dont on connaît *ex ante* la probabilité. Le mot incertitude est réservé au cas où la distribution de probabilité des états du monde possibles est inconnue. Nous nous limitons dans cette première section à l'univers risqué.

Notre objectif est de rechercher un critère de décision qui puisse être généralisé à un schéma de décision répété en information croissante. Nous examinons en premier lieu l'axiomatique de Von Neumann et Morgenstern dans le cas d'un choix à une seule étape (1.1). Si l'extension de cette théorie aux choix répétés les plus généraux se révèle difficile (1.2), elle reste néanmoins possible sous certaines conditions restrictives dans le cas particulier de la décision en matière climatique (1.3).

1.1. L'axiomatique de Von Neumann et Morgenstern

Depuis l'origine, la théorie de la décision en univers non certain (qu'elle soit sous risques ou sous incertitudes) se donne pour objet de traduire sous la forme mathématique la plus simple possible des préférences préexistantes sur un ensemble donné d'actes dont les conséquences dépendent de la réalisation d'une variable aléatoire. Tous les résultats que nous allons examiner à partir de maintenant se présentent donc sous la même forme : soit un ensemble donné d'actes dont les conséquences dépendent de la réalisation d'une variable aléatoire, soit une relation de préférence sur ces actes, si cette préférence vérifie tel ou tel jeu de propriétés, alors elle peut être représentée mathématiquement par une fonction qui associe à chaque acte un nombre réel, et telle qu'entre deux actes possibles, le préféré est celui dont le nombre réel associé est le plus grand.

Dans leur ouvrage « *Theory of games and economic behavior* » (1944), John Von Neumann et Oskar Morgenstern définissent d'abord les loteries comme des tirages qui entraînent la réalisation d'un événement x parmi un ensemble X avec une probabilité connue $p(x)$. Ils supposent ensuite un agent capable de faire des choix entre ces loteries. Ils démontrent alors que, si ces préférences vérifient les propriétés de complétude, de transitivité, de continuité faible et d'indépendance, il existe une fonction d'utilité définie à une fonction affine près sur l'espace des événements possibles et telle que la relation de préférences sur les loteries puisse être représentée par l'espérance de l'utilité de la loterie.

La présentation du théorème de Von Neumann et Morgenstern retenue ici est volontairement non technique. La perte de rigueur mathématique nous semble être compensée par une plus grande lisibilité et une plus grande compacité du propos⁴. Précisons simplement la nature des hypothèses formulées sur les préférences. Les deux premières sont essentiellement techniques : la complétude signifie que toutes les loteries sont comparables deux à deux, et la transitivité recouvre le fait que si la loterie p est préférée à p' et p' à p'' , alors p est préférée à p'' .

La continuité (faible) signifie que si p est préférée à p' et si p' est préférée à p'' , alors il existe un réel a compris entre 0 et 1 tel que $a.p + (1-a).p''$ soit indifférent à p' . Ce qui est ici important n'est pas tant la propriété de continuité elle-même que la signification de la loterie composée $a.p + (1-a).p''$. Celle-ci peut en effet être interprétée soit comme une loterie à deux étapes où l'on tire d'abord entre p et p'' avec probabilité a et $1-a$, puis ensuite le résultat de p ou de p'' , soit comme une loterie à une seule étape où l'on tire en une seule fois un événement x avec probabilité $a.p(x) + (1-a).p''(x)$. Le principe d'indifférence entre ces deux loteries formulé ici est aussi appelé axiome de réduction des loteries

⁴ Le lecteur intéressé trouvera dans Arrow (1971) un exposé techniquement complet, ainsi que la preuve du théorème. Il pourra aussi se référer à Luce et Raiffa (1957) pour une présentation nettement plus détaillée et une discussion très fouillée du résultat.

composées : il signifie essentiellement que l'ordre de succession des événements aléatoires ne compte pas, ce qui constitue, comme nous le verrons par la suite, une limitation importante dans le cas de schémas de décisions séquentielles dans lesquels l'information est croissante et les croyances peuvent être révisées.

L'axiome d'indépendance signifie enfin que si la loterie p est préférée à la loterie p' , alors toute combinaison linéaire de p avec une autre loterie $a.p+(1-a).p''$ sera préférée à $a.p'+(1-a).p''$ où a est compris entre 0 et 1. De fait, si l'agent a le choix entre, d'une part, obtenir p ou p'' avec probabilité a et $(1-a)$ et d'autre part obtenir p' ou p'' avec les mêmes probabilités, et s'il préfère la loterie p à la loterie p' , alors il préférera la première loterie composée à la seconde.

Von Neumann et Morgenstern démontrent alors que si les préférences de l'agent sur les loteries vérifient ces quatre propriétés, il existe une fonction d'utilité U sur l'espace des loteries définie à une fonction affine près et donnée par la relation (2.1) suivante, où $u(x)$ est l'utilité associée à la loterie qui permet d'obtenir la conséquence x avec probabilité 1.

$$U(p) = \sum_x u(x).p(x) \quad (2.1)$$

Le théorème de Von Neumann et Morgenstern est particulièrement important dans la mesure où il fournit une représentation très simple des préférences. Notons en particulier que les préférences des agents sur l'espace des conséquences et la distribution de probabilité attachée à chacune de ces conséquences sont clairement séparées.

La capacité de ce modèle théorique à rendre compte des comportements réels des agents en situation de choix risqué a cependant été critiquée. De nombreux auteurs, à commencer par Allais (1953) ont en effet mis en évidence des situations dans lesquelles les agents ne font pas des choix cohérents avec ce qu'ils devraient faire si leurs préférences vérifiaient les axiomes de base du théorème de Von Neumann et Morgenstern⁵. Ces observations les ont conduits à développer plusieurs théories alternatives non basées sur la maximisation de l'utilité espérée.

L'exposé de cette controverse théorique dépasse largement le cadre de ce travail. Notons simplement que l'un des nœuds de la discussion concerne précisément la capacité des approches n'utilisant pas l'utilité espérée de générer, une fois étendues à la décision séquentielle, des plans d'action temporellement cohérents⁶.

1.2. Décision séquentielle et préférences induites sur les revenus : l'aporie de Kreps et Porteus

L'axiomatique de Von Neumann et Morgenstern n'est pas *stricto sensu* limitée à des décisions isolées. Elle permet en effet de considérer des choix successifs entre loteries, mais l'axiome de réduction des loteries composées stipule que tous ces choix peuvent se réduire à un seul, et ce indépendamment de leur ordre. Les choix répétés sont donc pris en compte, mais uniquement dans la mesure où l'agent est neutre vis-à-vis de l'ordre et de la date de résolution des incertitudes.

⁵ Le paradoxe de Allais peut être représenté par un exemple très simple. Première question, préférez-vous avoir 10% de chances de gagner 10000 (unités d'utilité) (1) ou 9% de chances de gagner 15000 (2) ? Seconde question, préférez-vous avoir 100% de chances de gagner 10000 (3) ou 90% de chances de gagner 15000 (4) ? La plupart des gens (dont l'auteur) préfèrent (2) à (1), mais (3) à (4).

Or en introduisant la loterie (5) qui donne 0 avec probabilité 100%, nous avons (1) = 0,1.(3)+0,9.(5) et (2) = 0,1.(4)+0,9.(5). Si l'axiome d'indépendance était respecté, alors nous devrions avoir en même temps (1) préféré à (2) et (3) préféré à (4) ou l'inverse.

⁶ Le lecteur trouvera dans Karni et Schmeidler (1991) une large revue récente de la littérature sur le débat entre « maximisateurs de l'utilité espérée » et « non maximisateurs de l'utilité espérée ». Machina (1989) propose quant à lui une discussion très fouillée sur les arguments de cohérence temporelle.

Les choses sont plus compliquées lorsque la date de résolution des incertitudes compte (Spence et Zeckhauser, 1972, Drèze et Modigliani, 1972). Pour s'en convaincre, considérons le problème posé par Kreps et Porteus (1979a). Soit un agent qui dispose d'un revenu total R qu'il peut utiliser indifféremment pour financer sa consommation à la première ou à la seconde période. Ses préférences sur les vecteurs de consommation sont données par une fonction d'utilité de Von Neumann et Morgenstern $u(c_1, c_2) = \ln(c_1) + \ln(c_2) + 1$, avec son revenu $R = c_1 + c_2$. Supposons maintenant que le revenu de l'agent ne soit pas délivré en une seule fois, mais en deux traites r_1 à la première période et r_2 à la seconde. L'agent pouvant emprunter ou prêter sur un marché financier à taux nul, nous avons maintenant $r_1 + r_2 = c_1 + c_2$.

Nous supposons maintenant que le revenu de l'agent est aléatoire. Il peut toucher ($r_1=0,5$ $r_2=0,5$) ou ($r_1=0,5$ $r_2=1,5$) avec probabilité $\frac{1}{2}$ pour chacun des deux états du monde possibles. Nous noterons l_1 cette première loterie. Nous supposons en outre que l'incertitude est levée avant que l'agent ne prenne aucune décision. Dans ce premier cas de figure, l'utilité qu'il peut espérer retirer de cette loterie est donnée par l'équation suivante (2.2) ci-dessous, et elle vaut numériquement 0,307. De ce fait, la loterie l_1 est équivalente, en ce sens que l'utilité espérée est la même, à une loterie dégénérée l_2 dans laquelle l'agent recevrait de manière certaine un revenu de la forme ($r_1=0,707$ $r_2=0,707$).

$$U(l_1) = \frac{1}{2} \text{Max}_{c_1, c_2} \{u(c_1, c_2) \mid c_1 + c_2 = 0,5 + 0,5\} + \frac{1}{2} \text{Max}_{c_1, c_2} \{u(c_1, c_2) \mid c_1 + c_2 = 0,5 + 1,5\} \quad (2.2)$$

Supposons maintenant que l'agent se trouve face à la même loterie l_1 , mais que l'incertitude ne soit résolue qu'après le choix de la consommation de première période c_1 . Dans ce cas, l'utilité espérée qu'il peut retirer de la même loterie l_1 est donnée par le programme de maximisation (2.3) suivant, dans lequel le niveau de consommation optimal c_1 est choisi avant la résolution de l'incertitude. L'utilité espérée est bien entendu plus faible et vaut 0,200, ce qui est équivalent à une loterie dégénérée l_3 dans laquelle l'agent recevrait de manière certaine le revenu ($r_1=0,670$ $r_2=0,670$).

$$U(l_1) = \text{Max}_{c_1} \left[\frac{1}{2} \text{Max}_{c_2} \{u(c_1, c_2) \mid c_1 + c_2 = 0,5 + 0,5\} + \frac{1}{2} \text{Max}_{c_2} \{u(c_1, c_2) \mid c_1 + c_2 = 0,5 + 1,5\} \right] \quad (2.3)$$

De fait, la structure de préférence induite par la fonction d'utilité de la consommation u sur les loteries de revenu présente la particularité de dépendre de la date de résolution des incertitudes : il n'est pas indifférent à l'agent que l'incertitude sur son revenu soit levée avant ou après la seconde période⁷. Ces préférences ne vérifient donc pas l'axiome de réduction des loteries composées.

Supposons maintenant que la date de résolution des incertitudes soit fixée une fois pour toute après la décision de consommation de première période. Même dans ce cadre restrictif, les préférences induites sur les loteries de revenu par la fonction d'utilité sur les niveaux de consommation ne vérifient toujours pas l'axiome de réduction des utilités composées. Considérons en effet sous les mêmes hypothèses que précédemment la loterie l_4 qui donne ($r_1=0,5$ $r_2=0,1$) ou ($0,5$ $6,202$) avec probabilité ($\frac{1}{2}$ $\frac{1}{2}$). Le lecteur vérifiera que l'utilité espérée de cette loterie est de 0,200 avec la formule (2.3). De fait, les loteries l_1 et l_4 ont la même utilité espérée. Or la loterie l_5 composée avec l_1 et l_4 et donnant ($0,5$ $0,1$) ($0,5$ $0,5$) ($0,5$ $1,5$) ($0,5$ $6,202$) avec probabilité ($\frac{1}{4}$ $\frac{1}{4}$ $\frac{1}{4}$ $\frac{1}{4}$) a une utilité espérée de 0,050, utilité nettement plus faible que celle associée aux loteries l_1 ou l_4 .

Ces deux exemples montrent que les préférences induites par les préférences sur la consommation sur les loteries de revenus ne vérifient pas les axiomes de Von Neumann et Morgenstern, et en particulier pas l'axiome de réduction des loteries composées. Dans trois articles successifs, Kreps et Porteus développent un cadre d'analyse plus global permettant de retrouver le confort d'un théorème de représentation à la Von Neumann et Morgenstern sur les loteries de revenus tenant compte de la date de résolution des incertitudes.

⁷ Il s'agit précisément de l'effet « d'épargne de précaution » (*precautionary saving*) mesuré par Kimball (1990).

Ils y parviennent en introduisant des loteries temporelles, c'est-à-dire dans lesquelles la résolution des incertitudes est datée. Ils montrent que si les préférences entre ces loteries répondent à des axiomes simples dérivés « naturellement » de ceux de Von Neumann et Morgenstern, alors ces préférences peuvent être représentées par la maximisation de l'espérance d'une fonction qui dépend de la consommation (1978, 1979b) à la manière de l'équation (2.1). Cependant, le classement des loteries ainsi produit ne correspond en général pas au classement de ces mêmes loteries qui serait induit par la simple maximisation de l'utilité espérée de la consommation (1979a).

Dès lors, l'usage de l'espérance de l'utilité de la consommation pour déterminer le meilleur choix entre loteries portant sur le revenu (comme nous l'avons fait dans les exemples ci-dessus) demande à être examiné avec précaution. Comme l'écrivent les auteurs, « *The use of standard atemporal Von Neumann-Morgenstern preference in any dynamic model must at least be questioned.* » (Kreps et Porteus, 1979a, p.82).

1.3. De l'intérêt de l'hypothèse de maximisation de l'utilité en décision séquentielle

La difficulté de retrouver un théorème de représentation à la Von Neumann Morgenstern sur les loteries de distributions temporelles de revenus constitue un résultat particulièrement contraignant. Il n'est en effet plus possible de légitimer l'usage de l'utilité espérée comme représentation de préférences obéissant à certains axiomes simples. L'usage d'une telle fonction de choix reste possible, mais il doit soit être justifié autrement, soit posé comme une hypothèse *a priori* sur les comportements des agents.

Ce résultat concerne le cas général des choix entre loteries sur les revenus. Nous pouvons néanmoins revenir au théorème de Von Neumann et Morgenstern dans un cas particulier : si la distribution de probabilité sur le revenu de seconde période est donnée, et si l'ordre de résolution des incertitudes est fixé. Ce résultat se démontre de la manière suivante.

Nous nous plaçons à nouveau dans le problème de décision à deux périodes que nous avons étudié à la section précédente. Soit p_i une distribution de probabilités sur le niveau de revenu total R_i . Cette distribution est connue une fois pour toute. Supposons de plus que l'ordre des opérations soit aussi donné, et que la décision de première période doive intervenir avant que l'incertitude sur le revenu total ne soit résolue.

Dans ce contexte, choisir un niveau de consommation de première période c_1 revient à choisir la loterie de plans de consommation $(p_i, (c_1, w_i - c_1))$ parmi l'ensemble des loteries possibles $\{p_i, (c_1, w_i - c_1) \mid c_1 \in [0, \min_i(w_i)]\}$. Le point important est que, la distribution de probabilités étant donnée *ex ante*, cet ensemble de loteries possibles est très restreint. Dans le cas général étudié à la section 1.2 précédente, nous avons d'abord le choix d'une loterie, puis le choix d'un niveau de consommation. Dans le cas simplifié qui nous occupe, il ne subsiste plus que la seconde opération, qui se ramène au problème de décision sous risques standard vu en section 1.1.

En particulier, si la fonction d'utilité de la consommation $u(c_1, c_2)$ est elle-même Von Neumann Morgenstern, alors le meilleur choix est donné par la maximisation de l'espérance de l'utilité :

$$\text{Max}_{c_1} \sum_i p_i \cdot u(c_1, c_{2i}) = \text{Max}_{c_1} \sum_i p_i \cdot u(c_1, w_i - c_1) \quad (2.4)$$

Les hypothèses que nous avons formulées ici sont restrictives, mais elles définissent un cadre utile pour traiter, au moins en partie, de la question de la décision en matière climatique. Nous pouvons en effet considérer que la distribution de probabilité sur les impacts physiques du changement climatique est donnée une fois pour toute. Si nous supposons cette distribution connue (univers risqué), et que la

date de l'information est elle aussi donnée, nous nous trouvons alors dans un cadre logique identique à celui que nous venons de traiter au plan théorique.

En revanche, ce résultat ne constitue qu'une réponse partielle au problème de décision posé par le changement climatique. Les travaux de Kreps et Porteus nous indiquent en effet qu'il faut être très prudent pour toute tentative d'extension de ce schéma à des cas dans lesquels la distribution de probabilités sur les états du monde futurs et la décision de première période ne seraient pas indépendants. Le traitement de toute incertitude endogène, et donc l'évaluation de politiques aussi importantes que les politiques de recherche et développement, demande donc un examen spécifique.

2. De la décision en univers incertain

Nous disposons maintenant d'un critère de décision en présence de risques, c'est-à-dire étant donnée une distribution de probabilités sur les états du monde possibles. Mais que faire lorsque nous ne possédons pas *a priori* cette distribution de probabilité, ce qui est en particulier le cas pour les incertitudes liées au changement climatique ? Nous commencerons par examiner les différents critères de décision qui ont été proposés dans ce cadre de complète ignorance (2.1) avant de les retrouver dans un cadre axiomatique (2.2). Nous discuterons ensuite (2.3) l'axiomatique spécifique de Savage, qui permet de retrouver la maximisation de l'utilité espérée en introduisant un jeu de probabilités subjectives⁸.

2.1. Quatre critères de décision sous incertitudes

Commençons par définir le problème de décision sous incertitudes. De manière analogue au cas de la décision sous risque, nous supposons un agent qui possède une fonction d'utilité u sur un espace C de conséquences possibles. Il doit ensuite choisir une action a dans un ensemble A , sachant que la conséquence de cette action dépend de la réalisation ou du tirage d'un état du monde s parmi un ensemble S .

La littérature économique propose plusieurs critères de décision, initialement sur une base complètement empirique : minimax, maximin, α -critère de Hurwicz, minimax regret, et le principe des raisons insuffisantes. Nous les présentons successivement dans les paragraphes qui suivent.

2.1.1. Maximin et maximax

Le critère du maximin peut être considéré comme un critère relativement « conservateur ». Il consiste à choisir l'action dont l'utilité dans le pire des cas est la plus élevée. Formellement, on choisit :

$$\text{Max}_{a \in A} \text{Min}_{s \in S} u(a(s)) \quad (2.5)$$

Une position polaire consiste à adopter le critère du maximax, particulièrement « optimiste » qui consiste à choisir l'action dont l'utilité dans le meilleur des cas est la plus élevée, soit :

$$\text{Max}_{a \in A} \text{Max}_{s \in S} u(a(s)) \quad (2.6)$$

Il est possible d'adresser à ces deux critères des critiques symétriques. Ils indiquent en effet les actions uniquement en fonction de la pire (respectivement de la meilleure) des conséquences possibles, en ignorant complètement les autres.

⁸ Nous suivons ici l'ordre d'exposition de Luce et Raiffa (1957, chapitre 13).

Cette propriété peut déboucher sur des décisions *a priori* discutables. Pour illustrer ce point, considérons le problème de décision sous incertitudes (2.7) ci-dessous. Les actions de l'ensemble des choix A sont notées horizontalement, et les états du monde possibles (les éléments de l'ensemble S) sont notés verticalement. Le chiffre à l'intersection de la ligne a_i et de la colonne s_j est la conséquence (mesurée en utilité) du choix de l'action a_i si l'état du monde s_j se réalise. Dans le problème de décision sous incertitudes ci-dessous, l'action a_1 est préférée à l'action a_2 par le critère du maximin quel que soit la valeur de $x > 0$, ce qui peut sembler contre-intuitif si x est très élevé.

$$\begin{array}{cc} & s_1 & s_2 \\ \begin{array}{c} a_1 \\ a_2 \end{array} & \begin{bmatrix} 0 & x \\ 1 & 1 \end{bmatrix} \end{array} \quad (2.7)$$

2.1.2. α -critère de Hurwicz

Entre ces deux approches extrêmes, Hurwicz (1951) propose une voie médiane, dans laquelle chaque acte est indicé par la moyenne pondérée de l'utilité entre la pire et de la meilleure des conséquences. Notons α ($0 \leq \alpha \leq 1$) le coefficient de pondération, le α -critère s'écrit alors :

$$\text{Max}_{a \in A} \{ \alpha \cdot [\text{Min}_{s \in S} u(a(s))] + (1-\alpha) \cdot [\text{Max}_{s \in S} u(a(s))] \} \quad (2.8)$$

Cette seconde voie n'est cependant pas exempte, elle non plus, de défaut. Elle présente en effet la désagréable caractéristique de ne pas considérer comme optimale une action qui serait une loterie entre deux autres actions elles-mêmes optimales. L'exemple ci-dessus, dû à Luce et Raiffa (1957), le montre bien : si $\alpha = 0,25$, alors les actions a_1 et a_2 sont affectées de la même valeur ($0,25 \times 0 + 0,75 \times 1 = 0,75$) alors que l'action a_3 , qui n'est autre qu'une loterie entre les actions a_1 et a_2 , est affectée d'une valeur plus faible ($0,25 \times 0,5 + 0,75 \times 0,5 = 0,5$).

$$\begin{array}{cc} & s_1 & s_2 \\ \begin{array}{c} a_1 \\ a_2 \\ a_3 \end{array} & \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 1 & 0 \\ 0,5 & 0,5 \end{bmatrix} \end{array} \quad (2.9)$$

2.1.3. Critère de Minimax-Regret

Ce critère a été proposé par Savage (1951) dans le but d'améliorer le critère du maximin⁹. Le point central de cette méthode consiste à écrire à partir de la matrice de conséquences (en utilité) une matrice des « regrets » définis pour chaque état s_j comme la différence entre l'utilité de la meilleure conséquence qui puisse advenir dans cet état et l'utilité de la conséquence de l'acte a_i considéré. On choisit ensuite l'acte a_i dont le « regret » maximum est minimal. Soit formellement,

$$\text{On définit } r_{ij} = [\text{Max}_k u(a_k(s_j))] - u(a_i(s_j)) \text{ la matrice des regrets} \quad (2.10)$$

$$\text{Puis } \text{Min}_i \text{Max}_j r_{ij} \quad (2.11)$$

Si le critère du minimax regret permet d'éliminer les résultats « paradoxaux » obtenus avec le critère du maximin, il présente lui aussi des défauts. Le plus important d'entre eux est le fait que l'ordre de préférences entre deux alternatives peut changer par simple élimination de l'ensemble des actes possibles d'une troisième alternative pourtant dominée par les deux autres, comme l'illustre l'exemple (2.12) ci-dessous.

⁹ Le lecteur en trouvera une application au cas du changement climatique dans Loulou et Kanudia (1997).

$$\begin{array}{c} s_1 \quad s_2 \quad s_3 \\ a_1 \begin{bmatrix} 10 & 0 & 5 \end{bmatrix} \\ a_2 \begin{bmatrix} 5 & 10 & 2 \end{bmatrix} \\ a_3 \begin{bmatrix} 1 & 4 & 10 \end{bmatrix} \end{array} \quad (2.12)$$

Si les trois actions a_1 , a_2 et a_3 sont possibles, alors la matrice des regrets est la suivante :

$$\begin{array}{c} s_1 \quad s_2 \quad s_3 \\ a_1 \begin{bmatrix} 0 & 10 & 5 \end{bmatrix} \\ a_2 \begin{bmatrix} 5 & 0 & 8 \end{bmatrix} \\ a_3 \begin{bmatrix} 9 & 6 & 0 \end{bmatrix} \end{array} \quad (2.13)$$

De fait, le critère du minimax-regret classe les actions de la manière suivante : $a_2 > a_3 > a_1$. Or si nous éliminons maintenant l'action 1 de l'ensemble des actions possibles, nous obtenons maintenant le problème de décision :

$$\begin{array}{c} s_1 \quad s_2 \quad s_3 \\ a_2 \begin{bmatrix} 5 & 10 & 2 \end{bmatrix} \\ a_3 \begin{bmatrix} 1 & 4 & 10 \end{bmatrix} \end{array} \quad (2.14)$$

Dont la matrice des regrets est maintenant :

$$\begin{array}{c} s_1 \quad s_2 \quad s_3 \\ a_2 \begin{bmatrix} 0 & 0 & 8 \end{bmatrix} \\ a_3 \begin{bmatrix} 4 & 6 & 0 \end{bmatrix} \end{array} \quad (2.15)$$

Ce qui entraîne le classement suivant $a_3 > a_2$.

2.1.4. Principe de symétrie (« critère des raisons insuffisantes »)

Ce critère a été formulé pour la première fois par Jacob Bernouilli. Il stipule qu'en situation de complète ignorance, il faut postuler une distribution *a priori* de probabilités égale pour chaque état du monde possible.

L'application de ce critère bute cependant sur la question de l'identification des états du monde futurs, comme l'illustrent les deux problèmes de décision suivants. Dans le premier cas, les actions 1 et 2 sont indifférentes, alors que dans le second, l'action a_1 est préférée à a_2 .

$$\begin{array}{c} s_1 \quad s_2 \\ a_1 \begin{bmatrix} 0 & 1 \end{bmatrix} \\ a_2 \begin{bmatrix} 1 & 0 \end{bmatrix} \end{array} \text{ et } \begin{array}{c} s_1 \quad s_2 \quad s_3 \\ a_1 \begin{bmatrix} 0 & 1 & 1 \end{bmatrix} \\ a_2 \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \end{bmatrix} \end{array} \quad (2.16)$$

2.2. Axiomatique de la décision sous incertitudes

Le rapide tour d'horizon qui précède n'est pas de nature à rassurer. Aucun des critères précédemment présentés n'apparaît exempt de défaut. De plus, leur usage donne dans la majeure partie des cas des résultats très contrastés. Dans la présente sous-section, nous nous proposons de changer de point de vue en éliminant la fonction d'utilité sur l'espace des conséquences, et en ne conservant que la donnée d'une structure de préférence sur l'ensemble des actes possibles. Nous examinons ensuite les propriétés simples que peuvent raisonnablement vérifier ces préférences, et essayons d'en déduire ensuite les critères qui y répondent. L'axiomatique présentée est celle développée par Milnor (1954) puis reformulée par Luce et Raiffa (1957).

2.2.1. 10 axiomes encadrant les préférences

Axiome 1 : Tout problème de décision sous incertitudes a au moins une solution.

Axiome 2 : L'ensemble des meilleurs choix d'un problème de décision sous incertitudes est indifférent à toute transformation affine de la fonction d'utilité.

Axiome 3 : L'ensemble des meilleurs choix est invariant à un changement de dénomination des éléments de S.

Axiome 4 : Si a appartient à l'ensemble des meilleurs choix, et si a' est préféré ou indifférent à a , alors a' appartient aussi à l'ensemble des meilleurs choix.

Axiome 5 : Tout élément de l'ensemble des meilleurs choix est non dominé, en ce sens qu'il n'existe pas d'acte a' vérifiant $u(a'(s_i)) \geq u(a(s_i))$ pour tout i avec une inégalité stricte pour au moins un état.

Axiome 6 : Si un acte n'est pas optimal pour un problème de décision sous incertitudes, alors il ne peut être rendu optimal en ajoutant de nouveaux actes. De plus, un acte optimal ne peut devenir non optimal que si l'un des nouveaux actes est optimal.

Axiome 7 : Ajouter une constante à toutes les utilités des conséquences générées par un même état du monde ne change pas l'ensemble des meilleurs choix.

Axiome 8 : L'ensemble des meilleurs choix est convexe.

Axiome 9 : L'ensemble des meilleurs choix d'un problème de décision sous incertitudes ne dépend pas de la manière dont les états du monde sont étiquetés.

Axiome 10 : Retrancher à un problème de décision sous incertitudes une colonne répétée (c'est-à-dire un état du monde qui, pour chaque acte, entraîne les mêmes conséquences qu'un autre) ne change pas l'ensemble des meilleurs choix.

Commençons par quelques commentaires propres à chaque condition. Les axiomes 1 à 4 sont essentiellement techniques. Les imposer ne change pas fondamentalement le problème posé. L'axiome 5 est relativement naturel pour un économiste, puisqu'il constitue une forme de condition de Pareto¹⁰. L'axiome 6 est une formulation possible de la condition d'indépendance : l'accepter exclut le critère du minimax regret. L'axiome 7 est une propriété moins intuitive, qui exclut, si elle est acceptée, le α -critère et le critère du minimax. L'axiome 8 est une propriété de convexité qui exclut le α -critère ainsi que le maximax.

Notons que ces 8 premiers axiomes sont compatibles (le principe des raisons insuffisantes par exemple y répond), mais qu'ils excluent les minimax, maximax, minimax regret et α -critères. Luce et Raiffa montrent le théorème suivant :

Théorème 2.1 (Luce et Raiffa, 1957) : Soit une relation de préférence sur les actes qui satisfait les axiomes 1 à 8, il existe alors une distribution de probabilité *a priori* sur les états du monde telle que si un acte est optimal pour la relation de préférence, alors il est aussi optimal contre cette distribution de probabilité *a priori*.

Il est important de noter que le théorème 2.1 ne stipule pas que tous les actes optimaux contre la distribution de probabilités *a priori* soit optimaux pour le critère retenu. Mais il fournit une indication précieuse sur la forme du critère proposé.

¹⁰ En ne considérant plus un seul individu ayant à choisir des choix dont les conséquences dépendent de l'état du monde, mais N individus fictifs identiques ($N = \text{Card}(S)$) qui vont chacun vivre dans l'état du monde s_i .

Les axiomes 9 et 10 pris ensemble définissent quant à eux la situation de complète ignorance. Notons que s'ils sont compatibles entre eux, ils ne le sont pas avec les axiomes 1 à 8. Comme dans le cas précédent, il existe un théorème de représentation :

Théorème 2.2 (Arrow, 1953) : Toute relation de préférence sur les actes qui satisfait les axiomes 1, 3, 4, 6¹¹, 9 et 10 peut être représentée par une fonction qui ne dépend que des conséquences extrêmes associées à chaque acte.

En particulier, maximax, maximin et α -critères satisfont les hypothèses de ce théorème.

La caractérisation qui précède n'est pas suffisante pour choisir un critère, mais elle permet de mieux comprendre les hypothèses implicites sur lesquelles ils reposent.

2.3. La contribution de Savage

Le théorème 2.1 nous donne une indication précieuse sur la nature des critères de décision sous incertitudes, du moins sur ceux qui ne se placent pas d'emblée dans la situation d'ignorance complète de la probabilité d'occurrence des différents états du monde, c'est-à-dire qui rejettent les axiomes 9 et 10. Ce théorème nous indique en effet qu'une fois acceptés les axiomes 1 à 8, il est possible de trouver une distribution de probabilité *a priori* telle que, si un acte est optimal au sens de la relation de préférence, alors il l'est contre la distribution de probabilité.

L'ensemble des actes optimaux n'étant par hypothèse pas modifié si l'ensemble des actes est agrandi (axiomes 3 à 7), le jeu de probabilités est propre aux états du monde eux-mêmes. Il est possible de déterminer ces probabilités au moyen de petits problèmes de décision sous incertitudes à deux états du monde. Pour que cette distribution de probabilité résume ensuite l'ensemble du critère de décision, il est nécessaire d'ajouter des conditions de cohérence entre les choix entre deux états du monde, et les choix avec l'ensemble des états. C'est précisément l'esprit des travaux de Savage (1954) qui démontre le théorème de représentation suivant.

Théorème 2.3 (Savage, 1954) : Soit une relation de préférence sur l'ensemble des actes d'un problème de décision sous incertitudes. Si cette relation vérifie 7 axiomes de référence¹², alors il existe :

- Une unique fonction P définie sur l'ensemble des événements (ensemble des parties mesurables de S) vérifiant $P(E) \geq 0$ pour tout E , $P(S)=1$, si E et E' sont disjoints, $P(E \cup E') = P(E) + P(E')$ et $P(E) \leq P(E')$ si et seulement si E n'est pas plus probable que E' .

- Une fonction réelle u définie à une transformation affine positive près sur l'espace des conséquences telle que si E_i ($i=1,2,\dots,n$) et E'_j ($j=1,2,\dots,m$) sont deux partitions de S , et si l'acte A a pour conséquences c_i sur E_i et pour conséquences c'_j sur les E'_j , alors A est préféré à A' si et seulement si

$$\sum_{i=1}^n u(c_i).P(E_i) \geq \sum_{j=1}^m u(c'_j).P(E'_j) \quad (2.17)$$

La fonction P est appelée distribution de probabilité subjective. La fonction u est la fonction d'utilité de l'agent considéré.

¹¹ Il s'agit en fait d'une version légèrement plus forte de l'axiome 6 : ajouter un nouvel acte à un problème de décision sous incertitudes ne change pas un acte non optimal en acte optimal. De plus, de deux choses l'une : (i) soit tous les actes anciennement optimaux restent optimaux, (ii) soit aucun des actes anciennement optimaux ne reste optimal.

¹² Nous ne présentons pas ici ces axiomes dans un souci de concision. Le lecteur trouvera dans Savage (1954) ou dans Luce et Raiffa (1957) un exposé complet du théorème.

Le théorème de Savage est une extension de la théorie de Von Neumann et Morgenstern au cas de la décision sous incertitudes. Il génère en effet *en même temps* une fonction d'utilité et une distribution de probabilité *a priori* telle que les préférences de l'agent puissent être représentées par la maximisation (subjective cette fois-ci) de l'utilité espérée.

2.4. Quelle figure logique pour la décision en matière de changement climatique ?

Les résultats qui précèdent nous montrent que selon le jeu d'axiomes initial que nous utilisons pour caractériser nos préférences, le critère de décision en univers incertain change de manière radicale. Dans un cadre de complète ignorance sur les distributions de probabilité des événements futurs, le choix ne dépend finalement que des conséquences les plus extrêmes de chaque événement (théorème 2.2). L'intervalle entre le pire et le meilleur des cas est en effet la seule information certaine qui nous soit donnée. Lorsque cette hypothèse somme toute restrictive est levée, et lorsque les préférences vérifient quelques propriétés raisonnables, le théorème de Savage nous montre par contre que les agents prennent leurs décisions sous incertitudes en faisant implicitement comme s'ils attribuaient à chaque état du monde possible une probabilité subjective d'occurrence.

D'un point de vue opérationnel pourtant, l'utilisation du critère de l'espérance de l'utilité subjective est rendue difficile par la question de la détermination des probabilités *a priori* sur lesquelles vont être fondées le calcul. Le théorème de Savage indique en effet uniquement que si nos préférences obéissent à une certaine cohérence interne, alors nous choisissons dans l'incertain comme si nous maximisions une utilité espérée. Mais il reste muet sur la manière dont on peut exhiber ces probabilités avant que la décision ne soit prise. Nous nous trouvons dans une situation analogue à celle de la valeur d'option qui revêt, selon le mot d'Olivier Favereau, une forme paradoxale : soit est utile mais se révèle impossible à calculer, soit ne sert à rien mais est alors calculable (1991, p.80).

Cette critique est d'autant plus importante que, contrairement au point de vue commode adopté dans cette première partie, la décision est prise non pas par un seul, mais par une multiplicité d'agents dont les anticipations et les croyances diffèrent. Nous verrons en outre plus loin que les agents peuvent être amenés à manipuler stratégiquement ces probabilités pour favoriser la décision qui sert le plus leurs intérêts (Allais, 1953).

Faudrait-il dès lors revenir à un critère autre que la maximisation de l'utilité espérée ? Un tel changement de perspective présenterait l'intérêt de réduire le nombre de paramètres encore indéterminés, et en particulier d'esquiver le choix de probabilités subjectives. Mais cette opération présente aussi deux défauts majeurs. En premier lieu, elle s'opère au prix d'un abandon soit de l'information partielle disponible sur les incertitudes (maximax, minimax et α -critères en général), soit de l'hypothèse d'indépendance (minimax regret). En second lieu, l'incertitude sur les probabilités d'occurrence des différents états du monde futur constitue une donnée irréductible du problème climatique. Nous verrons plus loin que dans ce cadre, la coordination sur les différents futurs possibles constitue l'enjeu central de la discussion. Dans ce contexte, le choix de critères plus simples risque de créer une illusion d'optique dangereuse en masquant ce qui constitue au contraire la clé de la discussion.

S'il doivent permettre d'apporter un peu de rationalité dans le débat, les modèles, et en particulier les critères de décision en univers incertain sur lequel ils se fondent, doivent être capables de traduire les conflits entre anticipations et croyances contradictoires à propos de l'effet de serre. Dans ce cadre, le critère de maximisation de l'espérance de l'utilité subjective constitue un choix raisonnable. Il permet en effet de représenter explicitement les croyances par les probabilités subjectives. En second lieu, il distingue logiquement les énoncés relatifs aux états du monde futur, les probabilités, des énoncés relatifs aux préférences des agents et inscrites dans la fonction d'utilité.

3. De la préférence pour la flexibilité

Munis de ces critères, nous pouvons maintenant revenir à la « préférence pour la flexibilité ». La question qui se pose, et à laquelle nous allons tenter de répondre dans cette troisième et dernière section, est de savoir dans quelle mesure le classement des choix que ces critères sont susceptibles de produire traduit effectivement une « préférence pour la flexibilité », ou s'il faut y rajouter un élément supplémentaire pour prendre correctement en compte de la flexibilité.

3.1. Critère de maximisation de l'utilité espérée et « préférence pour la flexibilité »

3.1.1. Maximisation de l'utilité espérée : un critère dominant dans la littérature

Depuis les travaux de Henry (1974) et de Arrow et Fischer (1974), la théorie économique reconnaît qu'ajouter des incertitudes dans un problème de décision rend en général plus attractives qu'elles ne l'étaient en univers certain les actions qui préservent la flexibilité. Cet « effet d'irréversibilité » a progressivement été généralisé à toutes les situations de décision présentant à la fois des incertitudes et une information croissante. Relativement au critère de décision qu'ils utilisent, ces travaux peuvent être divisés en deux grandes catégories :

- Les premiers ont pour objet de montrer que « l'effet d'irréversibilité » ne peut être correctement mis à jour que par une analyse coûts avantages qui tienne explicitement compte de l'incertitude. Les travaux de Henry (1974) et Arrow et Fisher (1974) visaient ainsi à disqualifier la technique des équivalents certains, qui revient précisément à esquiver la question de l'incertitude en ramenant tous les flux incertains à une valeur certaine. Si cette première catégorie recouvre la plupart des travaux les plus anciens consacrés à la décision sous incertitudes, la structure logique de comparaison entre « sans » et « avec » prise en compte des irréversibilités se retrouve dans des papiers plus récents (Ha-Duong, 1998a par exemple).
- Les travaux de la seconde catégorie utilisent directement le critère de maximisation de l'utilité espérée, et essaient de préciser la direction et l'intensité de « l'effet d'irréversibilité », dans le domaine de l'environnement (Kolstad, 1996, Gollier *et al.*, 1997 ou Ha-Duong, 1998b) ou dans l'étude plus générale des décisions d'investissement sous incertitudes (Pindyck, 1991). Nous constatons ainsi que la majorité de la littérature accepte la maximisation de l'utilité espérée, obtenue récursivement en commençant par les décisions les plus lointaines dans le temps, comme un « bon » critère de décision.

Il serait abusif de tirer argument de cette apparente unanimité pour appuyer le fait que le critère de la maximisation de l'utilité espérée serait le mieux à même de prendre en compte la prime à la flexibilité qui apparaît en situation d'incertitudes et d'information croissante. Il nous semble par contre plus justifié d'en retenir l'idée suivante : le critère de maximisation de l'utilité espérée n'induit pas *a priori* de biais substantiel dans la prise en compte de l'effet d'irréversibilité.

3.1.2. Le théorème de Kreps

Un théorème de représentation très élégant démontré par David Kreps en 1979 vient appuyer cet argument. Supposons un agent placé devant un choix séquentiel. Dans une première étape, il doit choisir un ensemble de choix parmi un ensemble d'ensembles, puis dans un second temps choisir un élément de l'ensemble initialement retenu. Le lecteur peut par exemple imaginer qu'il doit choisir aujourd'hui un restaurant, puis demain un plat dans la carte dudit établissement. Alors les deux propriétés suivantes sont équivalentes :

- (i) Les préférences de l'agent sur les ensembles de choix vérifient (a) Tout ensemble x contenant l'ensemble x' est préféré à x' (i.e. si l'agent a une préférence sur l'ensemble qui lui assure le choix le plus important) et (b) Si le choix de x est indifférent à celui de $x \cup x'$, alors pour tout x'' , le choix de $x \cup x''$ est indifférent à celui de $x \cup x' \cup x''$.
- (ii) Il existe un ensemble fini S et une fonction U du produit $X \times S$ dans R (où X est l'ensemble des choix finaux) tel que les préférences de l'agent sur les ensembles de choix x soient représentées par la fonction v :

$$v(x) = \sum_s [\max_{z \in x} U(z, s)] \quad (2.18)$$

De plus, S est un singleton si et seulement si l'agent est totalement neutre vis-à-vis de la flexibilité, c'est-à-dire si ses préférences vérifient x préféré à x' implique x indifférent à $x \cup x'$. Dans le cas contraire, i.e. si l'agent a, en au moins un point, une préférence stricte pour la flexibilité (il préfère strictement $A \cup B$ à A même si A est préféré à B), alors S a au moins deux éléments.

Dans son article, Kreps insiste principalement sur l'implication (i) $\Rightarrow$ (ii), qui constitue un théorème de représentation de la préférence pour la flexibilité. En revenant au problème du restaurant, cette implication peut s'interpréter de la manière suivante. Dire qu'entre deux restaurants dont la carte du premier est plus large que la carte du second, je préfère le premier, revient à dire que je ne suis pas certain de mes préférences. Mais c'est la réciproque qui nous intéresse principalement ici : faire des choix en maximisant la somme espérée de l'utilité sur au moins deux états du monde distincts implique naturellement une préférence pour la flexibilité, au sens d'une préférence pour l'option dont les solutions sont les plus larges.

De fait, il ne semble en théorie pas nécessaire d'adjoindre au critère de maximisation de l'utilité espérée un mécanisme supplémentaire de préférence pour la flexibilité. Cependant, nous avons défini ici cette notion de manière très générale, et il convient maintenant d'examiner dans quelle mesure ces réflexions peuvent être adaptées au cas du changement climatique, qui présente de multiples sources d'irréversibilités, ou de diminution de la flexibilité, potentielles (dépenses d'abattement irrécupérables, « lock-in » techniques ou institutionnels, structurations de l'architecture des villes et des réseaux de transports, etc.). Pour ce faire, nous examinons une application directe au cas de la décision de première période en matière climatique.

3.2. Une première leçon des débats sur le « timing » de l'action face au réchauffement climatique : le rôle clé de l'articulation incertitude – inertie

Nous avons déjà souligné au chapitre 1 l'importance de l'incertitude pour l'élaboration des politiques climatiques. Mais nous avons aussi remarqué que cette importance découle de la présence d'inerties dans les systèmes climatiques et économiques. Sans inertie en effet, sauter d'une trajectoire d'émissions à une autre en fonctions de nouvelles informations pourrait se faire rapidement et sans coûts excessifs. Mais dès lors que, dans un secteur donné, la localisation des activités, les comportements ou les équipements dont la durée de vie est la plus longue sont structurés autour en un système cohérent, toute diminution importante des émissions, surtout si elle doit se faire rapidement, entraîne des coûts de transition élevés.

Dès 1995, Hourcade et Chapuis ont exploré la traduction de cet argument sur le « timing » optimal de l'action face au réchauffement climatique. Ils insistent sur la nécessité d'un équilibre entre une action trop précoce qui s'avèrerait trop importante si la concentration atmosphérique en CO_2 se révèle finalement pouvoir atteindre un niveau élevé, et une action trop tardive qui nous placerait devant les coûts très élevés d'un abattement accéléré en cas de surprise climatique défavorable. Les auteurs

illustrent cet arbitrage par la métaphore automobile suivante : « *A driver on a mountain pass road in late winter speculating about the presence of ice on a bend before a precipice [...] wants to maximize his speed, but [...] the risks are too high, and the useful information about the ice [will] come too late given the inertia of the car. Consequently, his behavior is not to adopt once and for all an optimized trajectory but to release the accelerator pedal and to push slightly on the brake, ready to slow down if, as he proceeds, he sees ice in the bend or to accelerate if the road proves clear.* » (p.434).

En 1996, le débat rebondit de manière spectaculaire avec la publication du papier de Wigley, Edmonds et Richels (1996) qui suggèrent qu'une politique de réduction des émissions anticipée n'est pas la manière la plus efficace de rester sous un seuil de concentration atmosphérique en CO₂ de 550 ppm. Retarder l'action, affirment-ils, permet en effet d'éviter le renouvellement prématuré du capital, de tirer profit des technologies non émettrices futures et, en transférant les coûts dans le futur, d'obtenir un coût total actualisé plus faible. Malgré les précautions prises par ses auteurs, ce papier est souvent interprété comme défendant une position attentiste, alors même qu'il devrait simplement aider à comprendre la distinction logique entre réduction des émissions et action : du fait de l'inertie, il peut en effet s'avérer nécessaire d'agir très vite, par exemple en développant la recherche et développement, afin de pouvoir réduire les émissions dans le futur.

Sans réfuter cet argument de « flexibilité temporelle », Ha-Duong, Grubb et Hourcade (1997) utilisent le critère de maximisation de l'utilité espérée pour montrer que traiter la cible de 550 ppm de manière stochastique et non plus déterministe implique des réductions des émissions sensiblement plus élevées à court terme du fait de l'interaction entre l'inertie et l'incertitude. Ils développent pour ce faire le modèle DIAM (Grubb *et al.*, 1995), modèle d'optimisation des trajectoires de réduction des émissions de CO₂. Ce modèle est en particulier caractérisé par le fait que les coûts d'abattement dépendent à la fois du niveau de réduction (x) et de la vitesse de cet effort (x') (2.19). Le paramètre c_a traduit les coûts d'ajustements permanents alors que c_b représente les coûts transitoires. Le terme $\sqrt{c_a/c_b}$, qui a la dimension d'un temps, peut ainsi être interprété comme la durée de renouvellement du capital au sein du système énergétique global.

$$C(x, x', t) = \frac{E_{\text{industrielle}}(t)}{E_{\text{industrielle}}(0)} [c_a x^2 + c_b x'^2] e^{-rt} \quad (2.19)$$

Dans sa version stochastique, le modèle DIAM fait l'hypothèse que l'information sur la valeur exacte du « bon » niveau de concentration (450, 550 ou 650 ppm) ne sera disponible qu'en 2020. Pour déterminer la trajectoire d'abattement optimale jusqu'à cette date, le modèle utilise le critère de la maximisation de l'utilité espérée en accordant *a priori* la même probabilité aux trois plafonds de concentration possibles. Nous retrouvons ici un problème de décision à deux périodes conceptuellement équivalent à celui que nous avons développé dans la section 2.2.

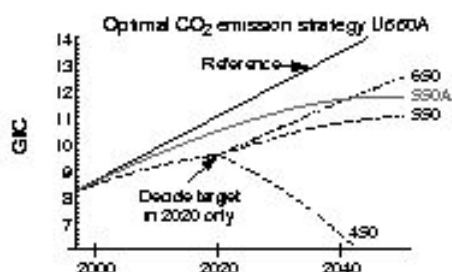


Figure 2.1 : Comparaison entre la décision optimale de court terme maximisant l'espérance de l'utilité (probabilité d'occurrence 1/3 1/3 1/3 pour les plafonds 450, 550 et 650 ppm) et les trajectoires optimales visant dès aujourd'hui l'un de ces trois seuils. (tiré de Ha-Duong *et al.*, 1997).

La comparaison entre la trajectoire optimale d'abattement 2000-2020 obtenue en maximisant l'utilité espérée et les trajectoires certaines correspondants respectivement aux trois plafonds est présenté sur

la figure 2.1. Elle fait apparaître que le niveau de réduction des émissions optimal en 2020 est plus faible que le niveau de réduction des émissions à la même date sur la trajectoire visant directement 550 ppm. Numériquement, le niveau optimal d'abattement en 2020 passe ainsi de 7% à 14% (taux d'actualisation de 5%). Les coûts élevés générés après 2020 si la concentration devait être stabilisée à 450 ppm l'emportent donc devant les risques de réduire les émissions à l'excès avant 2020 si la concentration s'avère finalement devoir être stabilisée à 650 ppm¹³.

L'utilisation d'un critère de maximisation de l'utilité espérée permet ainsi de mettre en évidence l'importance du jeu entre incertitude et inertie pour la décision de court terme. Le modèle fait en effet apparaître un niveau d'abattement plus élevé en 2020 dans le cas où 550 ppm est considéré comme une cible incertaine que dans le cas certain correspondant. Cet écart traduit l'intérêt qu'il y a à préserver plus de flexibilité (et donc de possibilité de réduire les émissions fortement après 2020) dès lors que nous tenons compte du fait que de l'information supplémentaire est susceptible d'arriver dans le futur. Nous n'avons pourtant introduit ici aucune préférence pour la flexibilité supplémentaire : le résultat découle uniquement de la représentation correcte des trois éléments constitutifs du problème de décision : l'incertitude, l'information croissante et l'inertie.

Conclusion

La notion de « décision séquentielle » introduite par le GIEC (Arrow *et al.*, 1996b) est à la fois un changement de perspective faisant porter l'accent sur la décision de court terme, un calendrier séquentiel des décisions, et un objectif de préférence pour la flexibilité. L'essentiel de notre attention aura été consacrée dans ce chapitre à ces deux derniers éléments, dont nous avons recherché une traduction analytique susceptible d'être intégré dans les modèles climatiques. Chemin faisant, le critère de maximisation de l'utilité espérée s'est imposée, sous risques comme sous incertitudes, comme l'outil le plus raisonnable pour un tel objectif. Deux commentaires s'imposent pourtant sur ce choix.

En premier lieu, la représentation d'un schéma de décision répété à l'aide de la maximisation de l'utilité espérée soulève des difficultés théoriques liées au fait que les axiomes de Von Neumann et Morgenstern sont très vite violés. Le problème simple du choix de la décision optimale de court terme étant donnée une distribution de probabilité sur les dommages du changement climatique et une date d'arrivée de l'information qui nous occupe ici échappe heureusement à cette critique. Mais toute analyse générale dans laquelle, par exemple, la date d'arrivée de l'information serait endogène au modèle requiert un retour approfondi sur la théorie.

En second lieu, nous n'avons pas introduit de préférence spécifique pour la flexibilité. La simple prise en compte de l'incertitude couplée au fait qu'il y a inertie et information croissante produit naturellement une décision d'abattement de court terme plus ambitieuse. Cette décision traduit non pas une « préférence pour la flexibilité » que formuleraient *a priori* les agents, mais résulte simplement de arbitrage entre coûts et bénéfices dans les différents cas de figure possibles. Ce constat, qui ne fait que reprendre l'analyse formulée dès 1974 par Henry appelle deux remarques :

¹³ Une autre manière d'illustrer cet argument consiste à examiner les conséquences d'un début des efforts de réduction des émissions en 2020. Le coût de ce retard reste modeste si le « bon » niveau de concentration s'avère finalement être 550 ppm. Il devient par contre très élevé pour un plafond de 450 ppm. La prédominance des risques de coûts si la concentration s'avère devoir être limitée à 450 ppm s'avère d'autant plus importante que la date de résolution des incertitudes est plus éloignée dans le temps : le taux de réduction des émissions optimal en 2020 passe ainsi à 20% si l'information n'arrive qu'en 2035. Cet effet se révèle enfin fortement corrélé avec le degré d'inertie du système socio-économique : doubler le degré d'inertie entraîne un doublement du coût du retard, alors que celui-ci devient négligeable si la durée de vie du capital est supposée inférieure à 10 ans.

- D'abord, il n'apparaît pas nécessaire d'introduire de paramètre *ad hoc* pour faire émerger une prime à la flexibilité. D'un point de vue logique, la « préférence pour la flexibilité » ne disqualifie en rien les outils de l'analyse économique standard.
- On pourra certes considérer que cette prime est insuffisante, et développer des outils supplémentaires pour « tirer » les décisions vers le plus flexible. Il nous semble cependant réfléchir à la plus ou moins grande flexibilité nécessite d'abord de représenter correctement les éléments : inertie, incertitude, et information croissante. Au-delà de la définition de la valeur d'option, c'est à notre sens le cœur du Claude Henry et de Arrow et Fisher.

Terminons en rappelant que choisir un critère de décision sous incertitudes ne constitue en aucun cas une manière de faire disparaître l'incertitude. L'incertitude est simplement reportée sur le choix des probabilités subjectives d'occurrence des différents états du monde possibles. Il constitue simplement une représentation un peu plus pertinente de la manière dont les agents prennent leurs décisions en univers incertain. Toute la question est maintenant d'étudier dans quelle mesure ces incertitudes influent sur la décision de court terme en matière d'effet de serre. C'est ce que nous nous proposons de faire dans le chapitre suivant.

Chapitre 3 Vers une hiérarchisation des incertitudes pesant sur la décision de court terme

Comme nous l'avons vu au chapitre précédent, le schéma de décision séquentiel proposé par le GIEC présente le mérite de mettre en avant un point crucial pour la décision en matière climatique : l'objectif n'est pas de construire une trajectoire d'abatement optimale à l'horizon 2100, mais simplement de prendre une première décision à court terme. Cette remarque n'est certes pas suffisante pour faire émerger un consensus général sur les mesures à adopter, mais, malgré son apparence triviale, elle ouvre de nouvelles perspectives sur la prise en compte de l'incertitude.

En effet, si toutes les incertitudes comptent pour la trajectoire d'abatement à long terme, seule une partie d'entre elles sont susceptibles d'avoir une influence sur la décision de court terme. Alan Manne et Richard Richels notent ainsi que : *« We do not need to be overly concerned by our inability to predict the detailed character of the energy system several decades into the future. Uncertainty is important only to the extent that it confounds near-term decision-making. Today's decision appear to be relatively insensitive to some of the most controversial long-term uncertainties in the greenhouse debate »* (Manne et Richels, 1992).

Notre objectif dans ce chapitre est de d'explorer le champ de recherche ainsi défini en hiérarchisant les incertitudes de long terme en fonction de l'impact qu'elles peuvent avoir sur la décision de court terme. Pour ce faire, nous nous proposons de procéder par expériences numériques menées au moyen d'une petite maquette analytique. En procédant de la sorte, nous restons fidèles à la ligne de conduite que nous nous sommes fixés dans l'introduction, à savoir introduire progressivement les difficultés en utilisant d'abord les outils les plus simples. Ce faisant, nous nous ouvrons en outre la possibilité de traiter analytiquement nos résultats, et d'en explorer ainsi de manière plus systématique le domaine de validité.

Il nous faut tout d'abord délimiter l'espace que nous allons explorer. En restant dans la limite d'un seul agent par génération, nous pouvons distinguer sept sources d'incertitudes principales. Ces sept niveaux d'incertitudes découlent dérivent des trois questions fondamentales que nous avons été amenés à nous poser pour évaluer les politiques climatiques : quelle est la nature des dommages du changement climatique ? Quelles sont nos capacités de réduction et/ou d'adaptation à ces changements ? Comment évaluer la lutte contre l'effet de serre par rapport à d'autres objectifs de politique publique, comme la santé ou l'éducation ?

La première question recouvre une très large gamme de phénomènes, tous fortement incertains, allant de la dynamique d'accumulation des GES dans l'atmosphère aux impacts finaux sur les différentes variables du climat comme sur les écosystèmes en passant par les liens entre la concentration atmosphérique en GES, le forçage radiatif et le changement climatique. Dans le modèle compact que nous utilisons, elle peut finalement être résumée par deux sources d'incertitudes :

- La forme et la paramétrisation de la fonction dommage : dans STARTS, les dommages sont supposés dépendre directement de la concentration atmosphérique en gaz à effet de serre. Toute l'incertitude sur les mécanismes physiques du changement climatique et sur la nature des impacts sur les économies se trouve ainsi résumée dans la nature de cette fonction.
- La date de résolution des incertitudes : il s'agit de la question duale de la première. La date d'acquisition de l'information est très incertaine, et l'équilibre entre action et financement de la recherche et développement dépend fortement de ce paramètre.

La seconde question « Quelles sont nos capacités de réduction des émissions et/ou d'adaptation à ces changements ? » renvoie aux anticipations et aux croyances sur les capacités techniques et institutionnelles des économies futures à réduire les émissions de GES ou à s'adapter au changement climatique. Cette question peut être résumée par quatre paramètres :

- La nature du scénario de référence¹ ou « *business as usual* » : cette incertitude est en général traitée en reproduisant les simulations avec différentes trajectoires de référence, caractérisées par un jeu d'hypothèses portant sur le taux de croissance économique de long terme et la trajectoire future d'émissions de CO₂.
- La fonction de coûts d'abattement : dans un modèle agrégé, cette fonction résume l'ensemble des informations disponibles sur le prix des efforts de réduction des émissions. Mais cette fonction recouvre en fait trois éléments particulièrement importants :
 - la nature des coûts statiques *stricto sensu*,
 - la nature autonome ou induite et le rythme du progrès technique,
 - et le degré d'inertie du système socio-économique.

La dernière question (« Comment évaluer la lutte contre l'effet de serre par rapport à d'autres objectifs de politique publique ? ») touche à l'arbitrage entre environnement et autres objectifs de politique publique. Comme le changement climatique constitue une menace non pas pour notre génération, mais pour celle de nos enfants ou plus sûrement de nos petits-enfants, la question centrale est d'arbitrer entre des politiques publiques destinées à réduire des risques potentiellement importants mais à long terme, et d'autres impératifs d'action publique actuels (éducation, santé, etc.). Nous avons pris le parti pour le moment de résumer cette discussion sur l'arbitrage intergénérationnel avec le taux d'actualisation.

Nous avons ainsi défini un espace comportant sept paramètres : nature de la fonction de dommages, date d'arrivée de l'information, la nature du scénario de référence, nature de la fonction de coûts, nature du progrès technique, degré d'inertie, taux d'actualisation. Sans forcément s'inscrire explicitement dans le programme de recherche défini par Manne et Richels, plusieurs auteurs l'ont déjà exploré en partie. Ils offrent ainsi des éléments d'une hiérarchisation de l'impact des incertitudes sur les politiques climatiques de court terme.

Les travaux de Manne et Richels eux-mêmes (1995) suggèrent que le niveau de dommage anticipé est déterminant pour la décision à 2020 loin devant le taux de croissance du scénario de référence ou le coût de la technologie future non carbonée. Leur analyse présente cependant l'inconvénient de ne pas n'explorer qu'un petit nombre de jeux de valeurs possibles pour ces trois paramètres.

Hourcade et Chapuis (1995) analysent l'articulation entre date d'acquisition de l'information, vitesse de pénétration du progrès technique et hypothèses sur l'existence des potentiels sans regret. Ils montrent en premier lieu que la date d'acquisition d'une information parfaite compte peu si elle reste rapide (moins de 40 ans) mais beaucoup si elle est lointaine, en ce sens que la valeur de l'information devient alors élevée. Un potentiel sans regret permettant d'améliorer la pénétration des technologies propres de 0,5% par an à coût total nul s'avère en second lieu suffisant pour faire en sorte que l'impact de l'incertitude sur la pénétration des technologies propres devienne très faible sur la décision de court terme.

Dans l'article dont nous avons rendu compte au chapitre précédent, Ha-Duong *et al.* (1997) construisent un modèle d'optimisation des politiques climatiques sous incertitude dans lequel l'information complète sur le plafond de concentration qui évite tout danger pour l'humanité arrive en 2020. Avant cette date, les trois plafonds 450, 550 et 650 ppm sont supposés équiprobables. Sur la

¹ La discussion sur la nature des scénarios de croissance futurs fera l'objet d'une section complète au chapitre 7.

base de ce schéma, les auteurs testent l'influence de deux paramètres sur la décision de court terme (ici 2020) : l'inertie et le taux d'actualisation. Dans cette étude, ces deux paramètres se révèlent ici avoir une influence relativement similaire sur la décision de court terme. Précisément, une augmentation du taux d'actualisation de 3% à 5% a le même impact sur la décision de court terme qu'une diminution du temps de la durée de vie moyenne du capital de 50 ans à 20 ans.

Proposer une hiérarchisation complète de l'impact des incertitudes que nous avons relevées sur la décision de court terme dépasse le cadre de notre travail. Nous nous proposons de centrer notre analyse sur le taux d'actualisation, en mesurant l'impact de ce paramètre sur la décision de court terme, et en comparant cet impact avec celui d'autres incertitudes de long terme. Nous commencerons par examiner cette question de manière analytique en développant une petite maquette très simple du schéma de décision séquentielle en matière climatique (section 1), avant d'illustrer ensuite numériquement ces résultats (section 2)².

1. Comparaison théorique du rôle du taux d'actualisation et des autres incertitudes pesant sur le niveau d'abattement de court terme

1.1. Un modèle abstrait du problème de décision en matière d'effet de serre

Nous représentons ici un problème de décision à trois périodes que nous numérotions sans grande imagination 1, 2 et 3. Au début de la première période, la société décide du montant d'argent qu'elle affecte à la réduction des émissions pour toute la durée de cette période. Elle ne dispose à ce moment là que d'une information partielle sur la nature des dommages du changement climatique, sous la forme de différentes fonctions de dommages possibles auxquelles sont affectées des probabilités subjectives. Au début de la seconde période, la véritable nature de la fonction de dommages est révélée : le décideur décide alors en toute connaissance de cause du montant des dépenses de réduction des émissions qu'il engage pour l'ensemble de cette seconde période. Au début de la troisième période enfin, la société subit les dommages du changement climatique.

1.1.1. Ecriture formelle

Nous notons t_1 , t_2 et t_3 les dates initiales des périodes 1, 2 et 3 respectivement, ainsi que n et m les longueurs des deux premières périodes. Désignons par ailleurs par c_1 le montant des dépenses engagées à la date t_1 , c_2 le montant des dépenses engagées à la date t_2 , et $D(c_1, c_2)$ les dommages du changement climatique compte tenu des efforts c_1 et c_2 . A la première période, l'information est incomplète, et le décideur possède simplement une distribution de probabilités subjectives p_i sur un ensemble de fonctions de dommages possibles D_i . Nous supposons ici que i est un indice discret prenant ses valeurs entre 1 et N . La figure 3.1 illustre graphiquement ce problème de décision de type « agir – apprendre – agir » (Manne et Richels, 1995, Arrow *et al.*, 1996b).

Comment représenter le problème de choix du décideur à la date t_1 ? Il s'agit de choisir un montant de dépenses d'abattement dans l'ignorance de la fonction de dommages. Conformément à ce que nous avons annoncé au chapitre 2, nous choisissons de représenter le problème de décision comme une maximisation de l'utilité espérée de la consommation par rapport à la distribution de probabilités p_i sur les états du monde caractérisés par des fonctions de dommages D_i . Si nous supposons de plus que les coûts de réduction des émissions comme les dommages du changement climatique restent faibles (au sens mathématique du terme) devant les niveaux de consommation, alors la maximisation de l'utilité espérée est équivalente au premier ordre à la minimisation des coûts totaux.

² Ce chapitre s'inspire d'une première hiérarchisation des incertitudes pesant sur la décision de court terme présentée aux Journées de l'optimisation (Montréal, 1997) dans une contribution co-rédigée avec Jean-Charles Hourcade et Minh Ha-Duong.

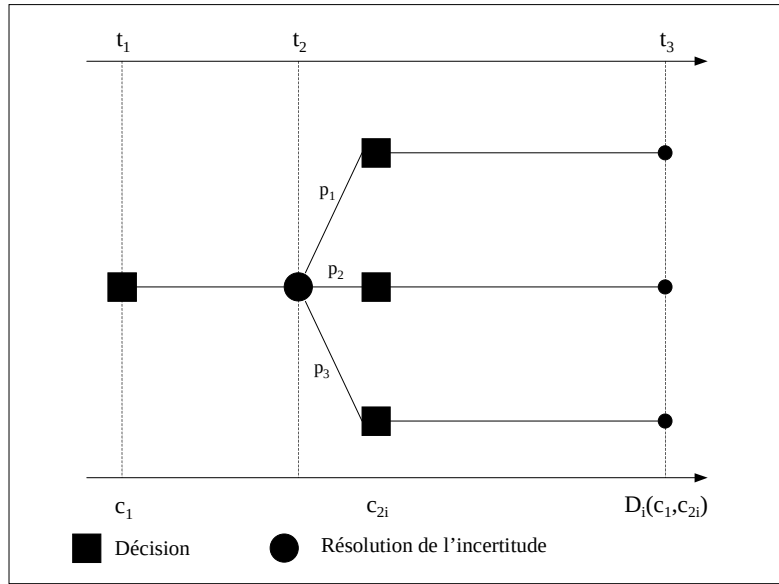


Figure 3.1 : Schéma du problème de décision en matière d'effet de serre. Le temps est représenté de gauche à droite (flèche du haut). Les carrés noirs symbolisent les décisions (flèche du bas), alors que le rond central représente la résolution de l'incertitude. Le problème de décision est donc divisé en quatre étapes : c_1 est décidé, l'état du monde D_i (probabilité ex ante p_i) est révélé, c_2^i est décidé et en fin de seconde période les dommages $D_i(c_1, c_2^i)$ interviennent.

Nous obtenons ainsi le programme (3.1)-(3.3) suivant, dans lequel les N variables c_2^i représentent les décisions à la date t_2 dans le cas où les dommages se sont révélés être de la forme D_i .

$$\text{Min}_{(c_1, c_2^i)} \quad J = c_1 + \varphi^n \cdot \sum_i p_i \cdot c_2^i + \varphi^m \cdot \sum_i p_i \cdot D_i(c_1, c_2^i) \quad (3.1)$$

$$c_1 \geq 0 \quad (3.2)$$

$$c_2^i \geq 0 \quad \forall i \in \{1, \dots, N\} \quad (3.3)$$

Nous avons vu au chapitre 1 que, pour rester cohérent avec un raisonnement en utilité, ce raisonnement sur les coûts doit utiliser un taux d'actualisation ρ égal à $\delta + gv$ où δ est le « taux de préférence pure pour le présent », g le taux de croissance moyen pour le futur et v l'élasticité de l'utilité marginale de la consommation, terme qui dépend de la forme de la fonction d'utilité. Le facteur d'actualisation que nous utilisons est donc donné par :

$$\varphi = \frac{1}{1+\rho} = \frac{1}{1+\delta+gv} \quad (3.4)$$

Avant de discuter la forme du problème (3.1)-(3.3) précisons la signification de coûts et de dommages « petits devant les niveaux de consommation ». Cette expression ne doit pas être prise au pied de la lettre : quel besoin en effet de se torturer l'esprit avec le changement climatique si ses effets se révèlent négligeables devant les niveaux de consommation futurs ? « Faible » signifie simplement ici que le programme de minimisation des coûts, qui est l'approximation d'ordre 1 du programme de maximisation de l'utilité, donne des résultats numériques proches. Cette approximation reste valable pour des coûts et des dommages du changement climatique élevés, jusqu'à au moins 5% du produit mondial brut, ce qui est très loin d'être économiquement négligeable.

1.1.2. Discussion de la forme du problème de décision

Le problème de décision (3.1)-(3.3) appelle trois commentaires. En premier lieu, toutes les dépenses de réduction des émissions à la première période (respectivement à la seconde période) sont supposées engagées dès la date t_1 (respectivement dès la date t_2). Les facteurs d'actualisation sont ainsi affectés d'une puissance n (respectivement m) dans le critère de maximisation (3.1). En toute logique, ces dépenses devraient être réparties tout au long des périodes considérées (par exemple proportionnellement au revenu total à l'année considérée), et le facteur d'actualisation devrait être adapté en conséquence. Nous retenons la formulation (3.1) pour simplifier les écritures. Nous vérifierons dans la seconde section que cette hypothèse n'a pas d'incidence sur les résultats qualitatifs obtenus.

En second lieu, dire que la fonction $D(c_1, c_2)$ est une fonction de dommages est en fait abusif (nous omettons ici les indices pour clarifier les notations). Cette fonction traduit en effet la manière dont les dommages de l'effet de serre sont contrôlés par les dépenses d'abattement aux périodes 1 et 2. Elle intègre donc à la fois des *informations économiques* (coûts d'abattement) et des *informations climatiques* (fonction de dommage). Pour clarifier cette double origine de la fonction D , nous faisons l'hypothèse que les dommages du changement climatique dépendent du niveau d'un indicateur environnemental unique. Dans ce cas, la fonction D peut être réécrite de la manière suivante :

$$D(c_1, c_2) = \theta \psi(c_1, c_2) \quad (3.5)$$

Dans cette décomposition, ψ est l'indicateur environnemental et θ la fonction de dommages du changement climatique *stricto sensu*. Nous choisissons par convention ψ croissante avec c_1 et c_2 . ψ représente donc ici un indicateur de la qualité de l'atmosphère, qui pourra par exemple être interprétée comme l'inverse de la concentration atmosphérique en CO_2 . La fonction de dommages θ est elle une fonction décroissante de la qualité de l'environnement ψ^3 . Cette décomposition permet de bien séparer l'incertitude environnementale de l'incertitude sur les coûts d'abattement. L'une ou l'autre des deux fonctions θ ou ψ (ou les deux) pourront donc être indicées par i selon que nous nous intéressons à l'incertitude environnementale ou à l'incertitude d'origine économique.

Pour terminer la caractérisation analytique des fonctions D_i , nous supposerons que les fonctions θ_i et ψ_i (et donc les fonctions D_i) sont continues et à dérivées continues. Cette hypothèse technique est nécessaire pour permettre une analyse mathématique simple des solutions du problème (3.1)-(3.3). Elle n'est pas trop contraignante pour la discussion sur la fonction de dommages dans la mesure où d'éventuelles discontinuités peuvent toujours être représentées en utilisant des fonctions continues, mais fortement non linéaires. Nous supposerons enfin qu'il est toujours possible en dépensant beaucoup de faire en sorte que les dommages soient nuls, soit mathématiquement :

$$\lim_{c_1 \rightarrow \infty, c_2 \rightarrow \infty} D_i(c_1, c_2) = 0 \quad (3.6)$$

³ Le lecteur pourrait objecter à juste titre que la décomposition de D proposée ne sépare pas complètement les aspects coûts de réduction des émissions des aspects climatiques, puisque la fonction ψ intègre à la fois les coûts de réduction des émissions et la dynamique de stockage du carbone dans l'atmosphère. Cette décomposition nous sera néanmoins utile dans la mesure où elle permet de distinguer entre les mécanismes d'accumulation du carbone atmosphérique, relativement bien connus, des fonctions de dommages *stricto sensu*, nettement plus incertaines.

1.2. Solution du problème de décision

1.2.1. Condition nécessaire d'optimalité

Les fonctions de dommage D_i étant par hypothèse continues, décroissantes, positives et à limite nulle lorsque les coûts sont suffisamment élevés, le problème (3.1)-(3.3) a au moins une solution. Les conditions nécessaires d'optimalité sont données par le système d'équations suivant :

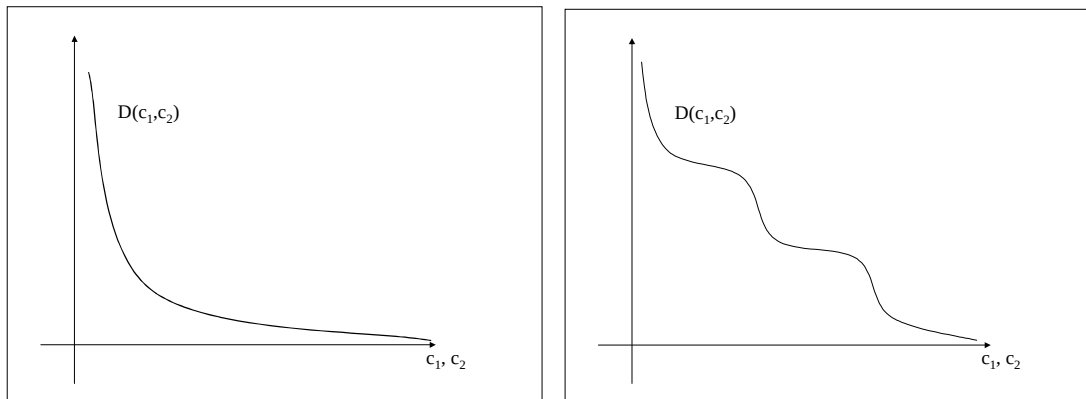
$$\begin{cases} \frac{\partial J}{\partial c_1} = 0 \\ \frac{\partial J}{\partial c_2} = 0 \quad (\forall i) \end{cases} \quad (3.7)$$

Soit finalement les $N+1$ conditions nécessaires suivantes :

$$\begin{cases} \sum_i p_i \cdot \frac{\partial D_i}{\partial c_1}(c_1^*, c_2^*) = -\phi^{-m} \\ \frac{\partial D_i}{\partial c_2}(c_1^*, c_2^*) = -\phi^{n-m} \quad (\forall i) \end{cases} \quad (3.8)$$

1.2.2. Unicité de la solution

Le système (3.8) n'a pas nécessairement de solution unique. Une condition suffisante pour qu'il y ait unicité est que les dérivées partielles des fonctions D_i soient monotones décroissantes en c_1 et c_2 . Graphiquement, il y a donc unicité si la fonction dommages est de la forme représentée sur la figure 3.2 ci-dessous, mais pas si elle est de la forme représentée sur la figure 3.3.



Figures 3.2 et 3.3 : Evolution des dommages en fonction des coûts de réduction des émissions. Sur la figure de gauche, les dommages marginaux relativement à c_1 ou à c_2 diminuent de manière monotone avec les niveaux de réduction des émissions : il y a unicité de la solution du système (3.1)-(3.3). Sur la figure de droite par contre, les dommages marginaux ne sont pas monotones : l'unicité de la solution n'est plus assurée.

Les plateaux horizontaux observés sur la figure 3.3 correspondent à des non linéarités provenant soit des coûts d'abattement, par exemple du fait de tickets d'entrée en recherche et développement nécessaires pour disposer ensuite de nouvelles technologies de réduction des émissions, soit des dommages, par exemple du fait de plages de température pendant lesquelles les réactions des écosystèmes restent qualitativement identiques avant de changer brutalement lorsque la température dépasse un seuil critique. De tels phénomènes étant tout à fait envisageables, il est *a priori* plus raisonnable de considérer que les fonctions D_i sont de la forme 3.3 plutôt que de la forme 3.2.

Cependant, nous ferons dans ce chapitre l'hypothèse restrictive selon laquelle le système (3.1)-(3.3) a une unique solution. Nous évitons ainsi l'analyse globale (et non plus locale) du système et l'étude des transitions catastrophiques entre les différents équilibres possibles. Cette hypothèse constitue cependant une limite évidente de notre approche, et un axe de développement naturel pour des recherches futures.

En outre, la solution des équations (3.8) constitue bien un minimum pour le critère J si et seulement si les courbes d'iso-dommages sont concaves (voir figure 3.4). Si les coûts marginaux d'abattement sont croissants avec le niveau d'abattement, ce qui est une hypothèse généralement admise, alors cette condition est remplie.

1.3. Intuitions graphiques du comportement du modèle

Avant d'analyser analytiquement les conditions du premier ordre (3.8), nous nous proposons d'examiner graphiquement la manière dont la solution du système (3.1)-(3.3) évolue avec le taux d'actualisation. Pour faciliter la lecture des figures, nous nous plaçons dans le cas simplifié $N=1$. Nous travaillons ainsi en dimension 2 dans le plan (c_1, c_2) et évitons les espaces de dimension supérieure, difficiles à représenter.

1.3.1. Position de la solution

La figure 3.4 présente la position de l'optimum dans le plan (c_1, c_2) . Pour bien comprendre cette représentation, définissons $\Gamma(c_1, c_2) = c_1 + \phi^n \cdot c_2$ la dépense d'abattement totale et actualisée. Le critère à maximiser, J , se simplifie alors en l'expression (3.9). Les conditions d'optimalité sont maintenant données de manière vectorielle par l'équation (3.10) suivante, dans laquelle le symbole $\vec{\nabla} f$ représente le gradient de la fonction f .

$$J = \Gamma(c_1, c_2) + \phi^m \cdot D(c_1, c_2) \quad (3.9)$$

$$\vec{\nabla} \Gamma + \phi^m \cdot \vec{\nabla} D = \vec{0} \quad (3.10)$$

Cette dernière équation a deux composantes. D'une part, à l'optimum, les vecteurs gradients des fonctions de dommages de dépenses sont colinéaires et de sens opposés. D'autre part, toujours à l'optimum, les normes de ces vecteurs vérifient la relation $\|\vec{\nabla} \Gamma\| = \phi^m \cdot \|\vec{\nabla} D\|$. Chacune de ces deux relations a une signification économique simple :

- La condition de colinéarité des vecteurs gradient signifie que les courbes d'iso-dommages (définies par D constant) et d'iso-coûts (définies par Γ constant) sont tangentes à l'optimum (c_1^*, c_2^*) . Les iso-dommages étant concaves, cette première condition exprime simplement le fait que l'optimum est le point qui permet d'obtenir le dommage le plus faible sans augmenter la dépense actualisée totale.
- La seconde condition d'égalité des normes des vecteurs gradients traduit simplement le fait qu'à l'optimum, les coûts marginaux de réduction des émissions actualisés sont égaux aux dommages marginaux actualisés.

Si nous choisissons $N=2$, l'égalité vectorielle reste identique mais doit maintenant être représentée dans l'espace à trois dimensions (c_1, c_2^1, c_2^2) . La dépense actualisée totale Γ est maintenant un plan qui est tangent aux surfaces d'isodommages au point d'équilibre (figure 3.5).

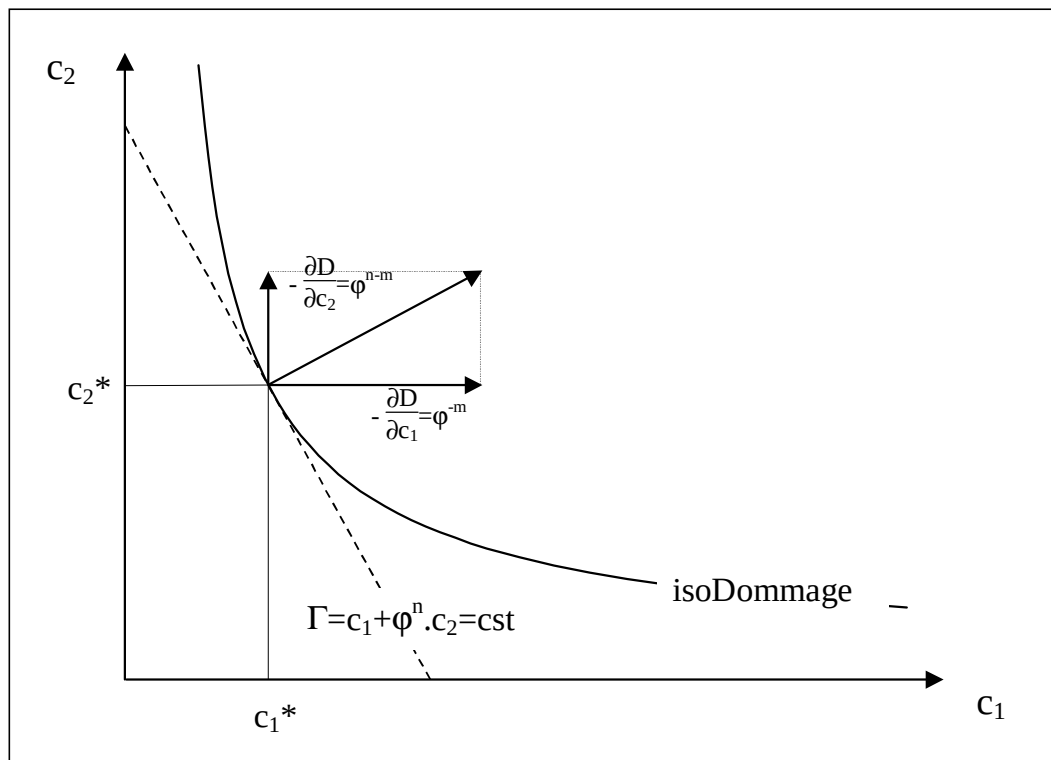


Figure 3.4 : Position de l'optimum dans le plan (c_1, c_2) . A l'optimum, les iso-dommages sont tangents aux iso- Γ . Le dommage marginal est en outre égal à la dépense marginale de réduction des émissions.

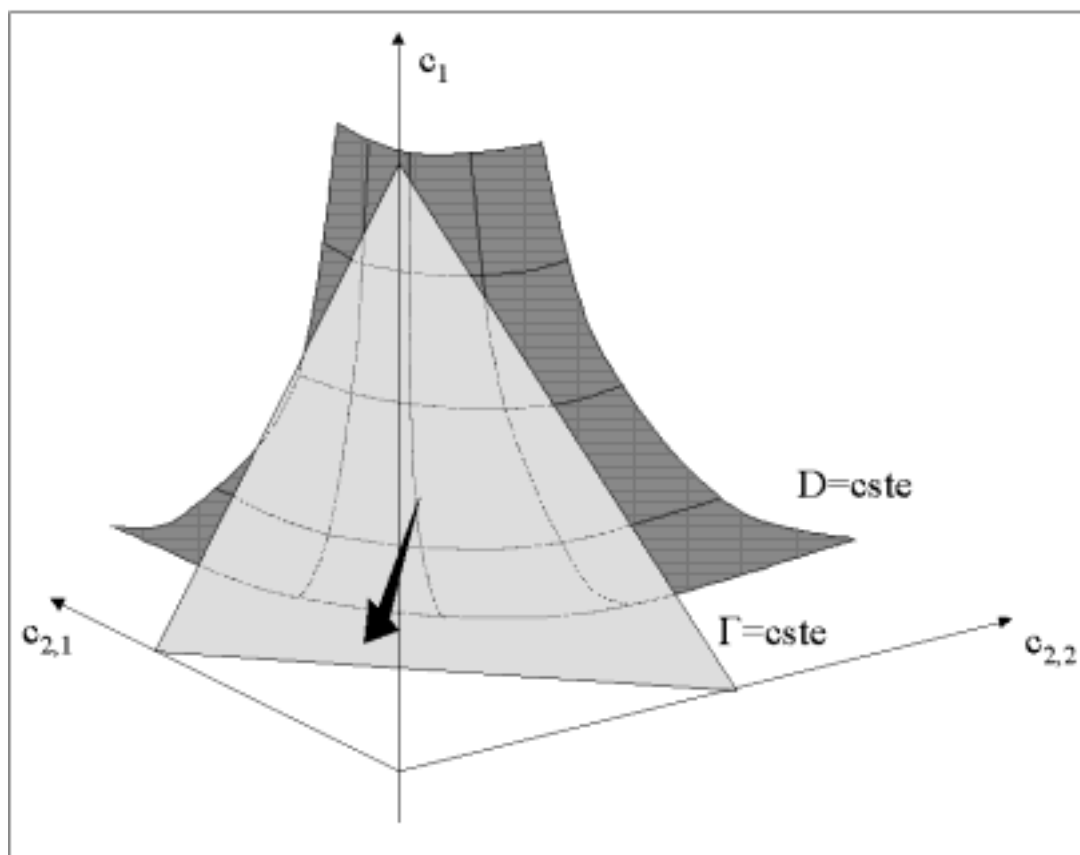


Figure 3.5 : Représentation graphique de la solution du problème (3.1)-(3.3) dans le cas $N=2$. Les iso-coûts Γ comme les iso-dommages sont maintenant des nappes à deux dimensions. Le vecteur gradient des dommages est représenté par la flèche noire.

1.3.2. Déplacement de l'optimum avec le taux d'actualisation

La figure 3.6 représente le déplacement de l'optimum lors d'une augmentation du taux d'actualisation, c'est-à-dire une diminution du facteur d'actualisation qui passe de ϕ à $\phi' < \phi$. Ce déplacement peut être divisé en deux étapes :

- Le déplacement AB de l'optimum initial (c_1^*, c_2^*) au point (c_1', c_2') représente l'effet de substitution des dépenses futures aux dépenses présentes du fait de l'augmentation du taux d'actualisation à niveau de dommage constant. Comme le dommage D est une fonction du niveau de qualité environnementale ψ , ce déplacement AB dépend uniquement de la forme des iso- ψ .
- Le déplacement BC du point (c_1', c_2') vers l'optimum final $(c_1'^*, c_2'^*)$ traduit le rééquilibrage entre dépenses et dommages. Du fait de l'augmentation du taux d'actualisation, un même dommage marginal futur apparaît maintenant plus faible vu d'aujourd'hui, ce qui induit une réduction de l'effort global. L'amplitude du déplacement BC dépend de la course de vitesse entre diminution de la dépense et augmentation des dommages induite par la diminution de la qualité environnementale ψ .

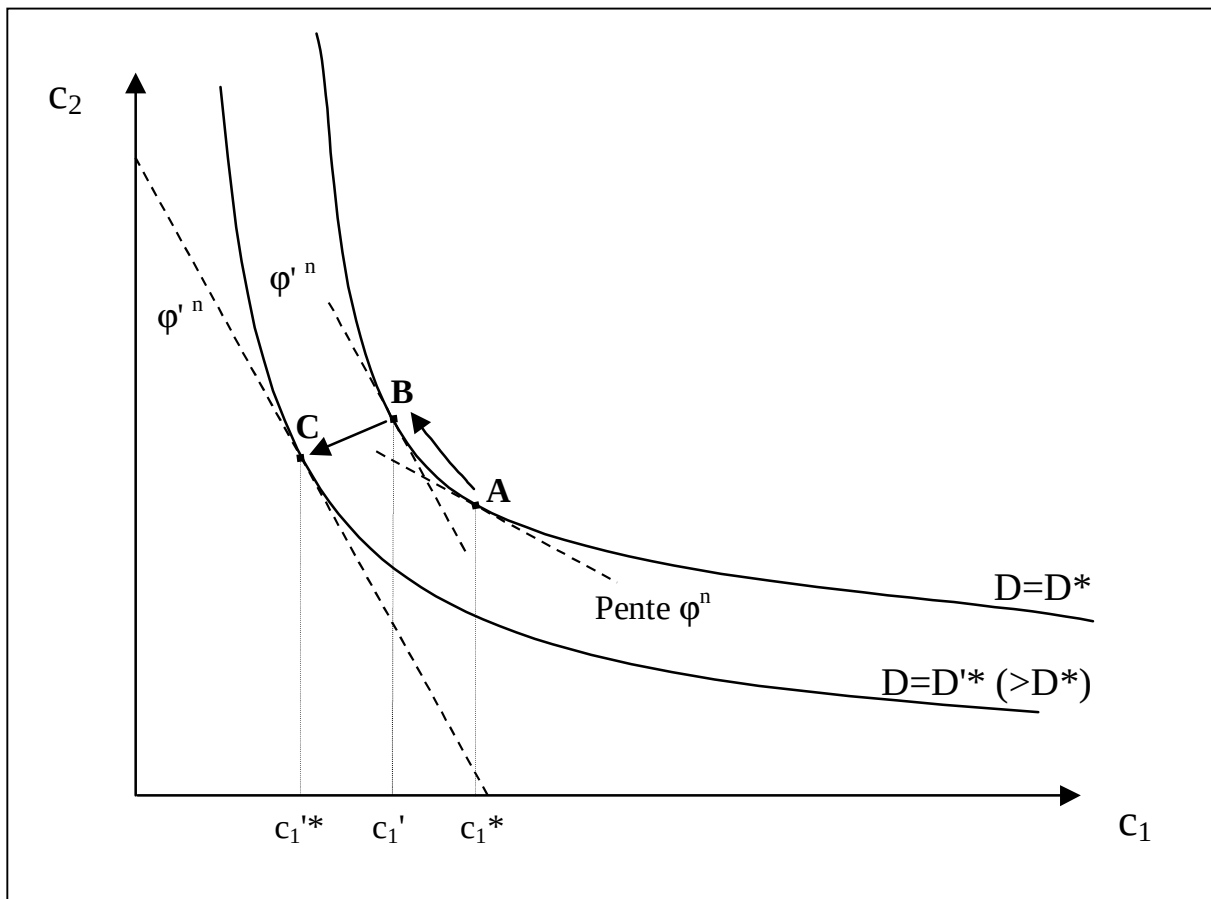


Figure 3.6 : Déplacement de l'optimum avec une augmentation du taux d'actualisation (le facteur d'actualisation passe alors de ϕ à ϕ' avec $\phi' < \phi$). Le passage de A (c_1^*, c_2^*) au point B (c_1', c_2') représente l'effet de substitution entre dépense présente et dépense future lié à l'augmentation du taux d'actualisation. Le passage de B (c_1', c_2') à C $(c_1'^*, c_2'^*)$ traduit le rééquilibrage entre coûts totaux et dommages totaux lié au fait que l'augmentation du taux d'actualisation diminue la valeur présente des dommages futurs.

Cette décomposition graphique est analogue à la décomposition en effet richesse et en effet de substitution de l'impact d'une variation du prix relatif des biens sur le choix du panier de

consommation. Nous allons maintenant examiner en détail les chacun des deux éléments de cette décomposition.

1.3.3. Effet de réallocation intertemporelle des dépenses

Le déplacement de la dépense de première période (c_1^* vers c_1') dû à l'effet de réallocation intertemporelle des dépenses dépend essentiellement, nous l'avons vu, de la pente de la courbe d'iso- ψ . Cette pente dépend à son tour des hypothèses formulées quant aux fonctions de coûts de réduction des émissions. Pour examiner comment l'impact du taux d'actualisation sur la décision de court terme (c_1) change en fonction des hypothèses formulées sur les coûts de réduction des émissions, nous devons donc étudier comment les iso- ψ se déforment en fonction de ces hypothèses. Nous considérons ici trois paramètres : le progrès technique autonome, le progrès technique induit et l'inertie du système économique.

a) Rôle du progrès technique autonome sur l'impact du taux d'actualisation sur la décision de court terme

Nous nous proposons de comparer la forme que prennent les iso- ψ selon les hypothèses formulées sur le progrès technique autonome. Comparons donc deux fonctions de coûts d'abattement, la seconde étant caractérisée par un progrès technique autonome plus important que la première. Autrement dit, à niveau de dépenses de première période donné, les dépenses de seconde période nécessaires pour atteindre un même niveau de qualité environnementale sont plus faibles dans le second cas que dans le premier. L'iso- ψ correspondant au même niveau de qualité environnementale est donc déplacée vers le bas comme le montre la figure 3.7.

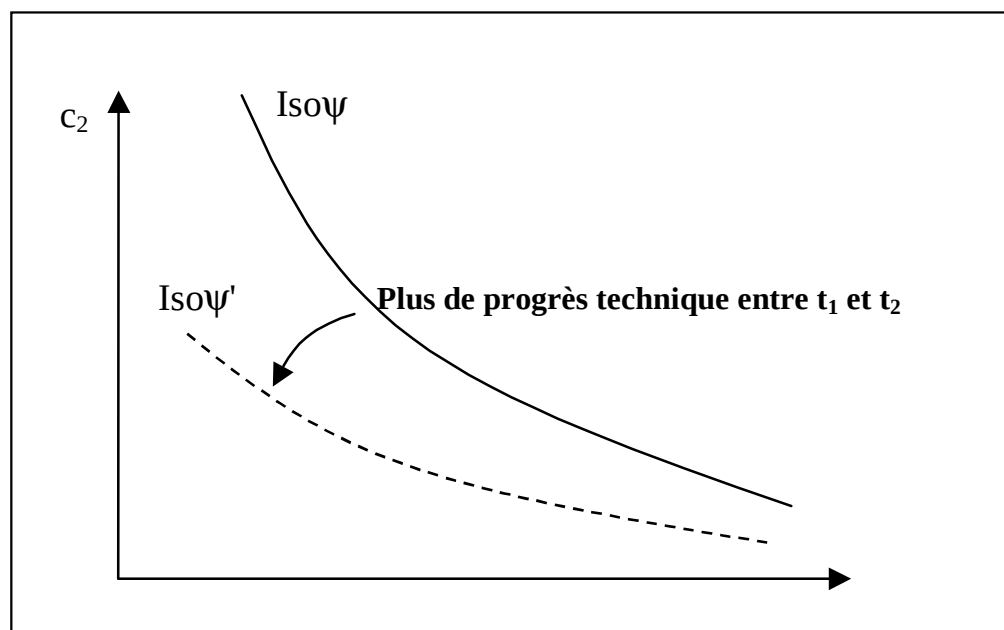


Figure 3.7 : Rôle du progrès technique autonome sur la forme des iso- ψ . Dans le premier cas (trait plein), le progrès technique autonome est plus faible que dans le second (trait pointillé).

Si nous faisons en outre l'hypothèse que le progrès technique autonome affecte de manière similaire l'ensemble de la courbe d'iso- ψ , ce qui revient à supposer que les coûts de l'ensemble des technologies propres sont réduits dans des proportions analogues au cours du temps⁴, alors la nouvelle courbe d'iso- ψ se déduit de l'ancienne par une affinité. De fait, à niveau de dépenses de première période constant, la pente de l'iso- ψ est plus faible dans la seconde situation que dans la première.

⁴ Nous avons par exemple retenu cette description dans le modèle STARTS décrit au chapitre 1.

Nous aboutissons ainsi graphiquement un premier résultat : la diminution des dépenses optimales d'abattement de première période induite par l'effet de substitution des dépenses AB lié à une augmentation du taux d'actualisation est d'autant plus importante que le progrès technique autonome est élevé.

b) Rôle du progrès technique induit sur l'impact du taux d'actualisation sur la décision de court terme

Examinons maintenant le rôle du progrès technique induit. Dans notre modèle très agrégé, nous représentons le progrès technique induit comme une diminution des coûts de réduction des émissions à la seconde période d'autant plus importante que les dépenses engagées en première période sont élevées. Comme précédemment, nous comparons deux cas de figure, le second étant caractérisé par un progrès technique induit plus important que le premier.

Comme dans le cas du progrès technique autonome, la courbe d'iso- ψ correspondant au cas de figure où le progrès technique induit est le plus fort se situe en dessous de la courbe d'iso- ψ correspondant au cas où le progrès technique induit est le plus faible (figure 3.8). Par contre, la pente de la seconde courbe est, à dépenses de première période égales, plus grande que la pente de la première courbe. En effet, la diminution des dépenses de seconde période nécessaire pour atteindre le même niveau de qualité environnementale est cette fois-ci d'autant plus importante que les dépenses de première période sont élevées. De fait, plus le progrès technique induit est important, plus l'effet de réallocation temporelle des dépenses sur la dépense optimale de première période est faible.

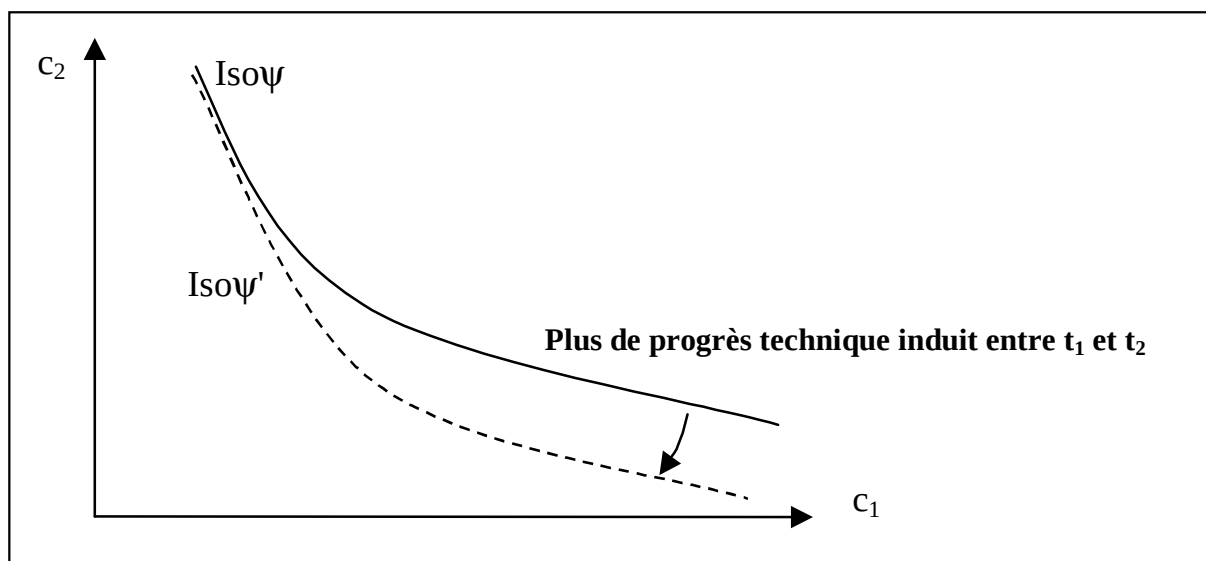


Figure 3.8 : Effet du progrès technique induit sur la forme des iso- ψ . Le progrès technique induit est moins important dans le premier cas (trait plein) que dans le second (trait pointillé).

c) Rôle de l'inertie sur l'impact du taux d'actualisation sur la décision de court terme

Passons maintenant à la question de l'inertie. Comme le notent Ha-Duong *et al.* (1997), l'inertie présente deux visages en apparence contradictoires : elle rend très chère toute action trop rapide aujourd'hui, mais elle rend en même temps plus chère toute action trop rapide demain. En termes graphiques, cette ambiguïté se traduit par le fait que les iso- ψ d'un monde plus inerte sont plus concaves que les iso- ψ d'un monde moins inerte (figure 3.9).

Quel est alors l'impact d'une plus grande inertie sur l'amplitude, en termes de dépense optimale de première période, d'une augmentation du taux d'actualisation ? La figure 3.9 nous laisse dans

l'expectative, dans la mesure où l'iso- ψ plus inerte est pour partie « plus plate » et pour partie « plus pentue ». Cependant, les facteurs d'actualisation sont tels que nous nous intéressons en général à la partie gauche (la plus pentue) de la courbe d'iso- ψ . De fait, plus les inerties sont grandes, plus l'impact sur la décision de première période de l'effet de réallocation temporelle dû à une variation du taux d'actualisation est faible.

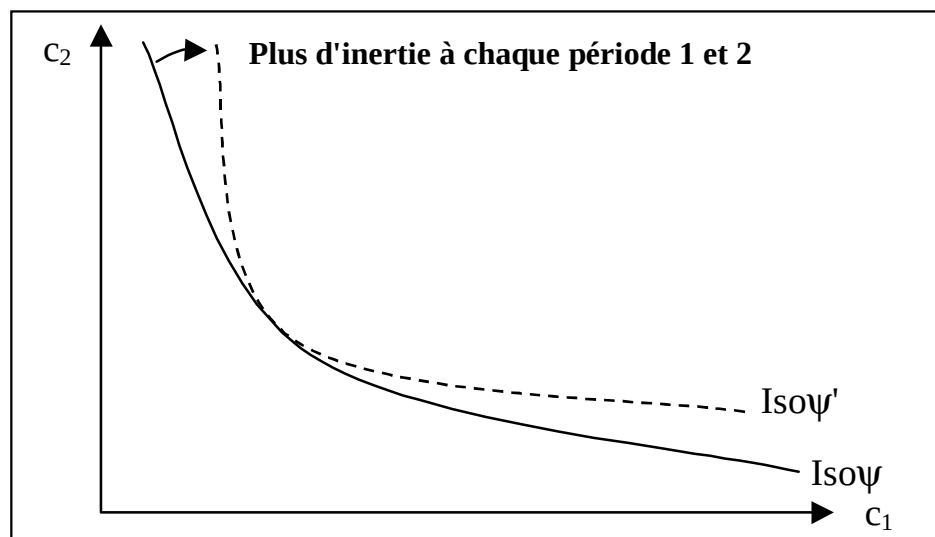


Figure 3.9 : Effet de l'inertie sur la forme des iso- ψ . La courbe en trait plein représente une fonction de coûts dans laquelle l'inertie est plus faible que dans le cas représenté en trait pointillé.

1.3.4. Effet de rééquilibrage coûts d'abattement - dommages.

L'effet de rééquilibrage entre coûts d'abattement et dommages dépend d'une course de vitesse entre la diminution des coûts d'abattement totaux Γ et l'augmentation des dommages θ en fonction de l'indicateur environnemental ψ . Si les dommages augmentent doucement avec la qualité de l'environnement (figure 3.10), alors le rééquilibrage entre coûts d'abattement et dommages sera important. Si au contraire les dommages augmentent très vite lorsque la qualité de l'environnement se dégrade, le rééquilibrage entre coûts d'abattement et dommages est très faible (figure 3.11).

L'impact de l'effet de rééquilibrage entre coûts d'abattement et dommages sur la décision de première période dépend non seulement de l'amplitude de ce déplacement, mais aussi de la pente des iso-dommages. Sur la figure 3.6, nous constatons en effet que plus les iso-dommages sont horizontales, plus l'impact de ce déplacement sur la décision de première période sera faible (et plus il sera important sur la décision de seconde période). Le fait de travailler avec des taux d'actualisation strictement positifs implique que nous nous trouvons sur les parties les plus pentues des iso-dommages (la valeur absolue de la pente de la droite d'iso-dépense, qui est égale à l'inverse du facteur d'actualisation, est en effet supérieure à 1). Nous pouvons nous attendre à constater que, plus le taux d'actualisation est élevé, plus l'effet de rééquilibrage entre coûts d'abattement et dommages sur la décision de première période est important.

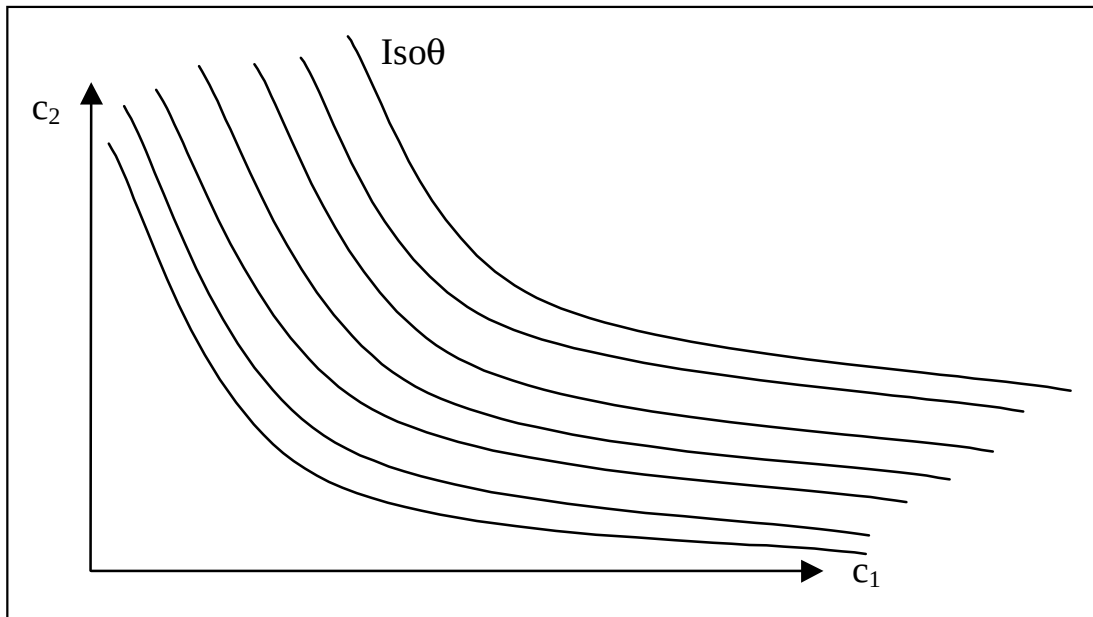


Figure 3.10 : Forme des iso- θ dans le cas d'une progression « lente » des dommages.

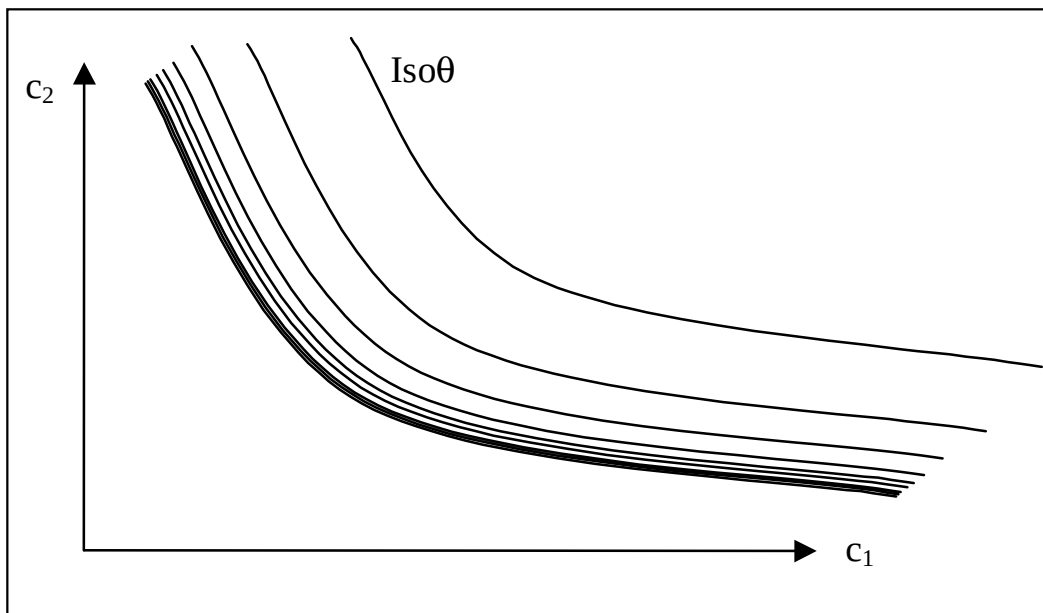


Figure 3.11 : Forme des iso- θ dans le cas d'une progression « rapide » des dommages.

1.3.5. Quelques remarques de synthèse sur cette approche graphique

L'examen graphique de la position des solutions du problème de décision (3.1)-(3.3) nous permet de formuler l'hypothèse selon laquelle la nature de la fonction dommages est discriminante. Lorsque les dommages augmentent très vite lorsque la qualité environnementale diminue, l'impact du taux d'actualisation sur la décision de court terme se réduit au seul effet de réallocation intertemporel des dépenses. En univers coûts efficacité, qui représente le cas limite dans lequel les iso- ψ sont toutes confondues, l'effet de rééquilibrage entre coûts d'abattement et dommages a complètement disparu.

Nous avons pu en outre dégager deux éléments pour caractériser le rôle de l'incertitude sur les coûts. En premier lieu, lorsque les dommages sont explosifs, plus d'inertie ou plus de progrès technique induit devrait contribuer à réduire l'impact du taux d'actualisation sur la décision de court terme. Les

courbes d'iso- ψ sont en effet plus pentues, ce qui réduit l'impact sur la décision de première période de l'effet de réallocation intertemporelle des dépenses. Plus de progrès technique autonome conduit au contraire à augmenter l'impact du taux d'actualisation sur la décision de court terme en rendant moins pentues les courbes d'iso- ψ .

En second lieu, lorsque les dommages évoluent de manière plus douce avec l'indicateur de qualité environnementale, l'impact de ces trois éléments est plus ambigu : des courbes d'iso- ψ dont les pentes sont plus raides diminuent en effet l'impact de l'effet de réallocation intertemporelle des dépenses sur la décision de première période, mais augmentent par contre l'impact de l'effet de rééquilibrage entre coûts d'abattement et dommages.

Nous nous proposons maintenant de déterminer dans quelle mesure ces observations ont un caractère général en examinant les solutions analytiques du problème de décision (3.1)-(3.3).

1.4. Caractérisation analytique des solutions du modèle

Pour examiner analytiquement les solutions des équations (3.8), il nous faut préciser la nature de la fonction de qualité environnementale ψ . Nous commençons par remarquer que les coûts marginaux de réduction des émissions sont en général donnés comme une fonction croissante du niveau d'abattement. En inversant cette relation, la quantité d'émissions évitée à chaque période est une fonction croissante du niveau de dépenses de réduction des émissions, mais dont la dérivée est décroissante. Nous supposons ensuite dans ce modèle simplifié que nous pouvons identifier la qualité de l'atmosphère à une fonction linéaire des quantités d'abattement réalisées à la première et à la seconde période⁵. Nous obtenons finalement pour indicateur environnemental la fonction ψ suivante :

$$\psi(c_1, c_2) = a.c_1^\alpha + b.c_2^\alpha \quad (\alpha < 1) \quad (3.11)$$

Nous commençons par travailler en dimension deux (c'est-à-dire pour $N=1$), le système d'équations (3.8) s'écrit alors :

$$\begin{cases} \theta'(\psi) \cdot \frac{\partial \psi}{\partial c_1} = -\phi^{-m} \\ \theta'(\psi) \cdot \frac{\partial \psi}{\partial c_2} = -\phi^{n-m} \end{cases} \quad (3.12)$$

$$\Leftrightarrow \begin{cases} \theta'(\psi) \cdot a\alpha \cdot c_1^{\alpha-1} = -\phi^{-m} \\ \theta'(\psi) \cdot b\alpha \cdot c_2^{\alpha-1} = -\phi^{n-m} \end{cases} \quad (3.13)-(3.14)$$

De fait, si le facteur d'actualisation passe en effet de ψ à ψ' , alors la dépense de première période optimale passe de c_1^* à $c_1^{*'}$ avec :

$$\frac{c_1^{*'}}{c_1^*} = \left(\frac{1+\rho}{1+\rho'} \right)^{\frac{m}{1-\alpha}} \cdot \left(\frac{\theta'(\psi')}{\theta'(\psi)} \right)^{\frac{1}{1-\alpha}} \quad (3.15)$$

Le premier facteur de ce produit traduit l'influence directe du taux d'actualisation : plus le taux d'actualisation augmente, plus la dépense optimale de première période diminue. Le second facteur traduit l'effet de la pente de la fonction dommages (qui accentue ou au contraire ralentit la diminution de c_1 selon que θ' décroît ou croît avec ψ). Il nous faut alors distinguer deux cas en fonction de la nature de la fonction dommages.

⁵ Cette hypothèse est cohérente avec la relation émissions – concentrations de Nordhaus retenue dans le modèle STARTS (voir chapitre 1).

1.4.1. Dommages linéaires

Dans le cas de dommages linéaires, la fonction de $\theta'(\psi)$ est constante. De fait, l'équation (3.15) se réduit à :

$$\frac{c_1^{*'}}{c_1^*} = \left(\frac{1+\rho}{1+\rho'} \right)^{\frac{m}{1-\alpha}} \quad (3.16)$$

Illustrons numériquement cette formule. Nous posons $\alpha=1/3$, ce qui correspond à des coûts marginaux de réduction des émissions en carré en fonction du niveau d'abattement (et est donc cohérent avec le modèle STARTS développé au chapitre 1). Nous choisissons en outre $m=100$ ans. Sous ces hypothèses, une augmentation de 1% du taux d'actualisation entraîne une diminution de la dépense de réduction des émissions optimale de 76%⁶. Il apparaît ainsi que lorsque les dommages sont linéaires, le niveau de réduction des émissions de première période dépend de manière importante de la valeur du taux d'actualisation.

1.4.2. Dommages explosifs

Dans le cas de dommages explosifs, la fonction θ' est décroissante avec ψ . De fait, le deuxième terme de l'équation joue comme une force de rappel qui ralentit la diminution de c_1 . Pour fixer les idées, donnons nous une fonction de dommages de la forme $\theta(\psi) = \psi^{-k}$ avec $k>1$. Le calcul est alors moins direct que dans le cas précédent, puisqu'il faut maintenant expliciter le second facteur de l'équation (3.15). En divisant la seconde équation du système (3.13)-(3.14) par la première, nous obtenons :

$$\frac{b}{a} \left(\frac{c_2}{c_1} \right)^{\alpha-1} = \varphi^n \quad (3.17)$$

$$\Rightarrow c_2 = c_1 \cdot \xi \cdot \varphi^{-\frac{n}{1-\alpha}} \quad (3.18)$$

Où nous avons posé :

$$\xi = \left(\frac{b}{a} \right)^{\frac{1}{1-\alpha}} \quad (3.19)$$

En remplaçant c_2 par sa valeur dans l'équation (3.11), la qualité environnementale ψ à l'optimum devient :

$$\psi = a \cdot c_1^\alpha \cdot [1 + \xi \cdot \varphi^{-\frac{n\alpha}{1-\alpha}}] \quad (3.20)$$

En remplaçant maintenant ψ par sa valeur dans l'équation (3.13), nous obtenons :

$$ak\alpha \cdot a^{-(k+1)} \cdot c_1^{-\alpha k - 1} \cdot \left(1 + \xi \cdot \varphi^{-\frac{n\alpha}{1-\alpha}} \right)^{(k+1)} = \varphi^{-m} \quad (3.21)$$

Soit finalement l'expression suivante pour la variation de c_1 suite à une variation du taux d'actualisation :

⁶ Ce chiffre reste stable pour des taux d'actualisation variant entre 2% et 10%.

$$\frac{c_1^*}{c_1^*} = \left(\frac{1+\rho}{1+\rho'} \right)^{\frac{m}{\alpha k+1}} \cdot \left(\frac{1+\xi \varphi'^{-\frac{n\alpha}{1-\alpha}}}{1+\xi \varphi^{-\frac{n\alpha}{1-\alpha}}} \right)^{\frac{k+1}{\alpha k+1}} \quad \text{avec } \xi = \left(\frac{b}{a} \right)^{\frac{1}{1-\alpha}} \quad (3.22)$$

Le premier terme de ce produit traduit à nouveau une diminution de c_1 . L'exposant plus faible que dans le cas linéaire traduit cependant une « élasticité actualisation de la dépense de première période » plus faible que dans le cas linéaire. Le second terme est quant à lui supérieur à 1 (puisque l'exposant de φ est négatif, le numérateur de la fraction est supérieur au dénominateur). Le produit des deux reste néanmoins inférieur à 1 sauf pour des valeurs de k très grandes (de l'ordre de grandeur de m).

Numériquement, si nous reprenons les mêmes hypothèses qu'au dessus, et si nous choisissons par ailleurs $k=5$ et $\frac{b}{a} = 2$ (ce qui revient à supposer que du fait du progrès technique un investissement d'un franc est deux fois plus efficace d'un point de vue climatique en seconde période qu'en première), nous obtenons une diminution du niveau de réduction des émissions optimal de 17% pour une augmentation du taux d'actualisation de 1%. Même si $k=1$ (dommages évoluant comme le carré de la concentration), la diminution de c_1 n'est encore que de 45%. Lorsque les dommages sont non linéaires, le taux d'actualisation s'avère donc numériquement avoir un impact plus faible sur la décision de court terme.

1.4.3. Cas général $N>1$

Revenons maintenant au cas général où N est supérieur à 1. Nous supposons ici que l'incertitude porte uniquement sur la fonction dommages *stricto sensu* θ et non sur l'indicateur environnemental ψ . De fait, le décideur possède au début de la première période une distribution de probabilités subjectives p_i que la « bonne » fonction de dommages soit de la forme θ_i . Les conditions nécessaires d'optimalité (3.8) s'écrivent alors :

$$\begin{cases} \sum_i p_i \cdot \theta_i'(\psi) \cdot a \alpha \cdot c_1^{\alpha-1} = -\varphi^{-m} \\ \theta_i'(\psi) \cdot b \alpha \cdot c_2^{i\alpha-1} = -\varphi^{-n-m} \end{cases} \quad (3.23)$$

La variation de la dépense de première période entraînée par une variation du taux d'actualisation de ρ à ρ' est maintenant donnée par :

$$\frac{c_1^*}{c_1^*} = \left(\frac{1+\rho}{1+\rho'} \right)^{\frac{m}{1-\alpha}} \cdot \left(\frac{\sum_i p_i \cdot \theta_i'(\psi')}{\sum_i p_i \cdot \theta_i'(\psi)} \right)^{\frac{1}{1-\alpha}} \quad (3.24)$$

Dans le cas où toutes les fonctions de dommages sont linéaires, le second facteur de ce produit ne change pas lorsque la qualité optimale de l'environnement passe de ψ à ψ' : nous retrouvons exactement le même comportement de la solution optimale de première période que dans le cas $N=1$, à savoir (3.25). Dans un cadre linéaire, l'introduction de l'incertitude sur la nature de la fonction dommages ne modifie pas la sensibilité du modèle au taux d'actualisation.

$$\frac{c_1^*}{c_1^*} = \left(\frac{1+\rho}{1+\rho'} \right)^{\frac{m}{1-\alpha}} \quad (3.25)$$

Dans le cas où l'une au moins des fonctions de dommages est explosive, le second facteur de l'équation (3.24) devient supérieur à 1. Cette « force de rappel » limite l'impact d'une variation du taux d'actualisation sur la décision de court terme. Son ampleur dépend de la probabilité

d'occurrence des dommages explosifs et la nature « plus ou moins explosive » des dommages, c'est-à-dire de la vitesse de variation du dommage marginal θ' lorsque la qualité de l'environnement diminue. Pour examiner en détail ce qui l'emporte, en particulier dans le cas d'une catastrophe possible mais de probabilité faible, il nous faut développer un modèle numérique. C'est l'objet de la prochaine section.

2. Illustration numérique de l'impact d'une variation du taux d'actualisation sur la décision de court terme en matière d'effet de serre

Nous revenons dans cette seconde section à une approche numérique. Pour faciliter le lien avec le modèle de décision développé dans la section précédente, nous en reprenons la formulation, en calibrant simplement ses paramètres sur la base des équations du modèle STARTS développé au chapitre 1.

2.1. Présentation du modèle

2.1.1. Problème de décision

Pour faciliter la calibration sur la base du modèle STARTS, nous introduisons les niveaux de réduction des émissions a_1 et a_2 , définis comme le nombre de tonnes de carbone évitées à chaque période par rapport aux émissions de référence E_1 et E_2 . Les coûts de réduction des émissions se présentent maintenant comme des fonctions de ces nouvelles variables.

En second lieu, nous considérons les coûts c_i et les dommages D_i comme des grandeurs annuelles et non plus globales sur l'ensemble de la période. Ainsi, c_1 correspond maintenant à la quantité d'argent, supposée constante, dépensée chaque année pour la réduction des émissions durant toute la première période. De même c_2 représente le coût d'abattement annuel pendant toute la durée de la seconde période. Les dommages annuels D_i sont enfin supposés être subis de manière permanente de l'instant t_3 jusqu'à l'infini. Nous devons donc corriger les facteurs d'actualisation de telle sorte qu'ils tiennent compte de cette nouvelle distribution temporelle des coûts.

Le problème de décision en matière de changement climatique s'écrit donc maintenant de la manière suivante :

$$\text{Min}_{(a_1, a_2)} \quad \varphi_1 c_1(a_1) + \varphi_2 \sum_i p_i \cdot c_2^i(a_2^i) + \varphi_3 \sum_i p_i \cdot \theta_i \psi(a_1, a_2^i) \quad (3.26)$$

$$0 \leq a_1 \leq E_1 \quad (3.27)$$

$$0 \leq a_2^i \leq E_2 \quad (3.28)$$

$$\text{Avec } \varphi = \frac{1}{1+\rho}, \quad \varphi_1 = \frac{1-\varphi^n}{1-\varphi}, \quad \varphi_2 = \varphi^n \cdot \frac{1-\varphi^{m-n}}{1-\varphi}, \quad \varphi_3 = \varphi^m \cdot \frac{1}{1-\varphi} \quad (3.29)$$

2.1.2. Calibration

En reprenant le modèle d'accumulation du carbone dans l'atmosphère développé au chapitre 1, et en identifiant l'indicateur environnemental ψ à la concentration atmosphérique en CO_2 (mesurée en parties par millions), nous obtenons l'expression suivante (3.30), où les abattements a_i et les émissions de référence E_i sont mesurées en GtC :

$$\psi = 288 + 0,072 \cdot (E_1 - n \cdot a_1) + 0,38 \cdot (E_2 - (m-n) \cdot a_2) \quad (3.30)$$

Nous retenons $n=20$ ans et $m=100$ ans. Le scénario de référence IS92a (Leggett *et al.*, 1992, Morita et Lee, 1997) nous donne alors $E_1 = 196$ GtC et $E_2 = 1254$ GtC.

Nous reprenons les coûts d'abattement développés pour le modèle STARTS, soit :

$$c_i(a_i) = E_i \cdot \frac{\bar{CT}_i}{3} \cdot \left(\frac{a_i}{(E_i/n)} \right)^3 \quad (3.31)$$

Dans cette expression, $\bar{CT}_i$ représente le coût d'une technologie non carbonée. Nous retenons ici $\bar{CT}_1 = 2000$ \$/tC et $\bar{CT}_2 = 1600$ \$/tC.

De la même manière qu'au chapitre 1, nous considérons ici deux types de fonctions de dommages, linéaire ou explosive, spécifiées de la manière suivante :

$$\theta_{lin} = PMB_{2100} \cdot \sigma \cdot \frac{\psi - \psi_{2000}}{2 \cdot \psi_{préindustriel}} \quad \text{Dommages linéaires} \quad (3.32)$$

$$\theta_{exp} = PMB_{2100} \cdot e^{-\left(\frac{\bar{\psi} - \psi}{v} \right)^2} \quad \text{Dommages explosifs} \quad (3.33)$$

Dans la première équation, PMB_{2100} est le produit mondial brut en 2100, ψ_{2000} la concentration atmosphérique en CO₂ en 2000, $\psi_{préindustriel}$ la concentration atmosphérique en CO₂ préindustrielle et σ mesure l'impact (en points du produit mondial brut) d'un doublement de la concentration en CO₂ par rapport à l'ère préindustrielle. Nous retenons ici $PMB_{2100} = 243,15 \cdot 10^{12}$ \$ qui correspond à un taux de croissance de 2% par an jusqu'en 2100 conformément au scénario IS92a, $\psi_{2000} = 360$ ppm, $\psi_{préindustriel} = 274$ ppm et σ compris entre 0,5% et 5%.

Dans la seconde équation, $\bar{\psi}$ est une concentration limite pour laquelle le dommage est maximal (i.e. 100% du PMB) et v contrôle la concentration ψ en deçà de laquelle les dommages sont économiquement négligeables (c'est-à-dire inférieurs à 0,1% du produit mondial brut). Nous utilisons $v = 38,05$ pour que $\bar{\psi} - \psi = 100$ ppm, et $\bar{\psi}$ valant respectivement 450, 550, 650 et 750 ppm.

2.2. Incertitude sur le montant des dommages

2.2.1. L'impact du taux d'actualisation sur la décision de court terme dépend fortement de la nature de la fonction de dommages

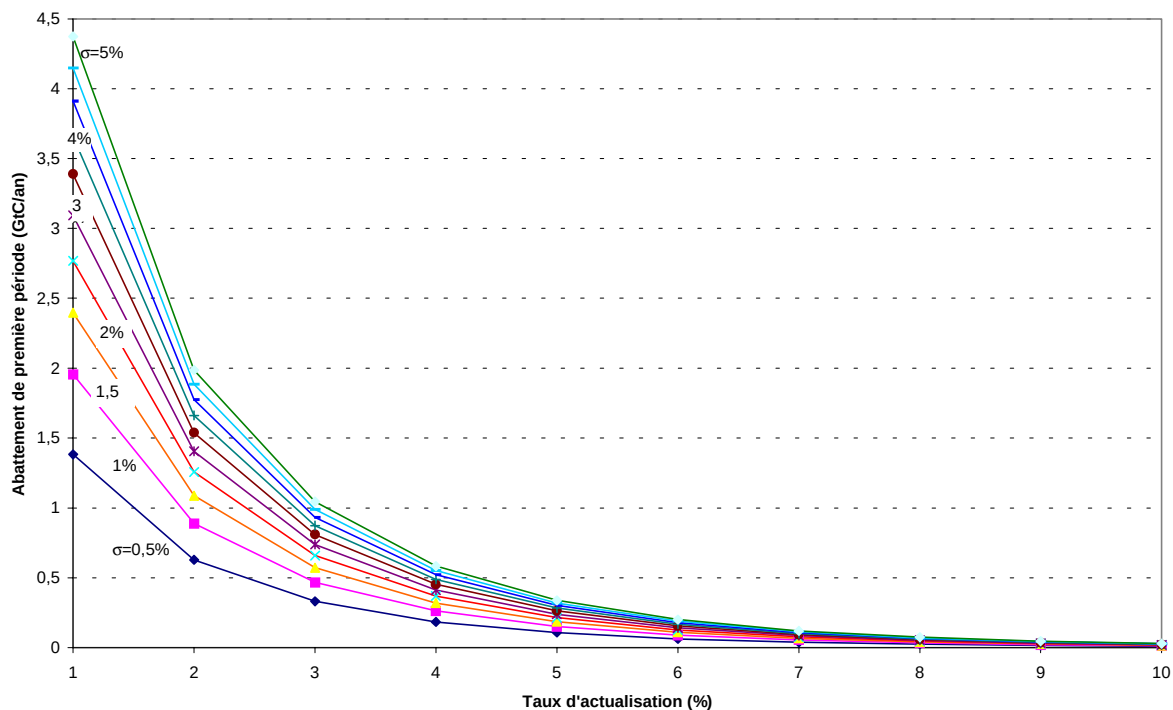


Figure 3.12 : Abattement de première période avec dommages linéaires selon la valeur de la pente des dommages et le taux d'actualisation (σ de 0,5 à 5% du PMB_{2100} , ρ de 1 à 10%).

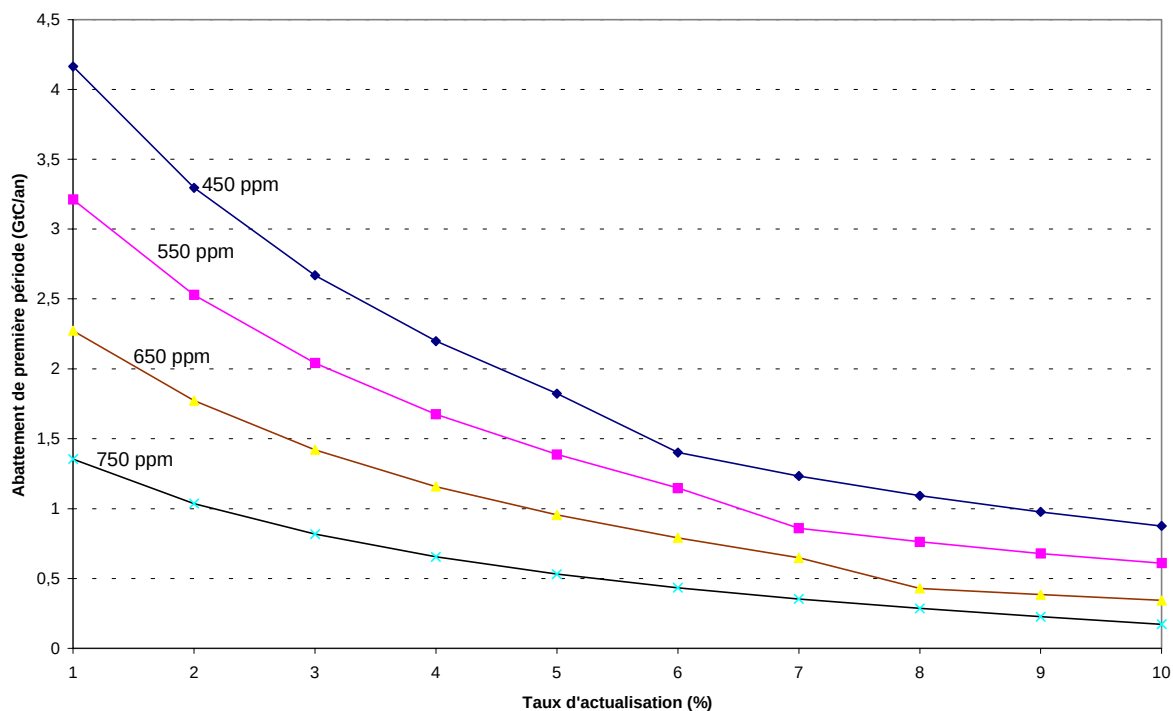


Figure 3.13 : Abattement de première période avec dommages explosifs selon la valeur du seuil de dommages et du taux d'actualisation ($\bar{\psi}$: 450-750 ppm, ρ : 1-10%).

La figure 3.12 présente les niveaux de réduction des émissions de première période avec dommages linéaires en fonction de la pente de la fonction dommages (paramètre σ) et du taux d'actualisation. La figure 3.13 présente en regard le même indicateur avec des dommages explosifs en fonction du seuil de dommages (paramètre $\bar{\psi}$) et à nouveau du taux d'actualisation. La comparaison des deux figures (dont on peut voir les résultats rassemblés sur le graphique 3.14) fait apparaître une grande différence dans la réponse à une variation du taux d'actualisation selon que les dommages sont linéaires ou explosifs. Ces profils numériques confirment ainsi l'intuition graphique et le calcul analytique de la section précédente.

D'un point de vue numérique, le niveau d'abattement optimal de première période diminue dans le cas linéaire d'environ 40% pour une augmentation de 1% du taux d'actualisation (pour des valeurs du taux comprises entre 3% et 7%). Ce chiffre est inférieur aux 80% que nous avons estimés dans la section précédente du fait du changement dans la date de paiement des coûts d'abattement : considérer que les coûts et les dommages sont des grandeurs annuelles contribue à limiter l'influence de l'actualisation. Par contre, toujours dans le cas linéaire, le taux de diminution de la dépense optimale de première période avec le taux d'actualisation s'avère parfaitement indépendant du niveau de dommages σ . Nous vérifions ainsi numériquement le résultat analytique obtenu dans la section précédente (équations 3.16 et 3.25).

Lorsque les dommages sont explosifs, une augmentation de 1% du taux d'actualisation entraîne une diminution de 18% environ du niveau optimal de réduction des émissions de première période. Ce chiffre se révèle à nouveau inférieur à l'estimation correspondante obtenue dans la section précédente, toujours du fait du changement dans le calcul des facteurs d'actualisation. De plus, ce chiffre est maintenant légèrement variable avec le niveau $\bar{\psi}$: il passe en effet de 18% pour 450 ppm à 20% pour 750 ppm.

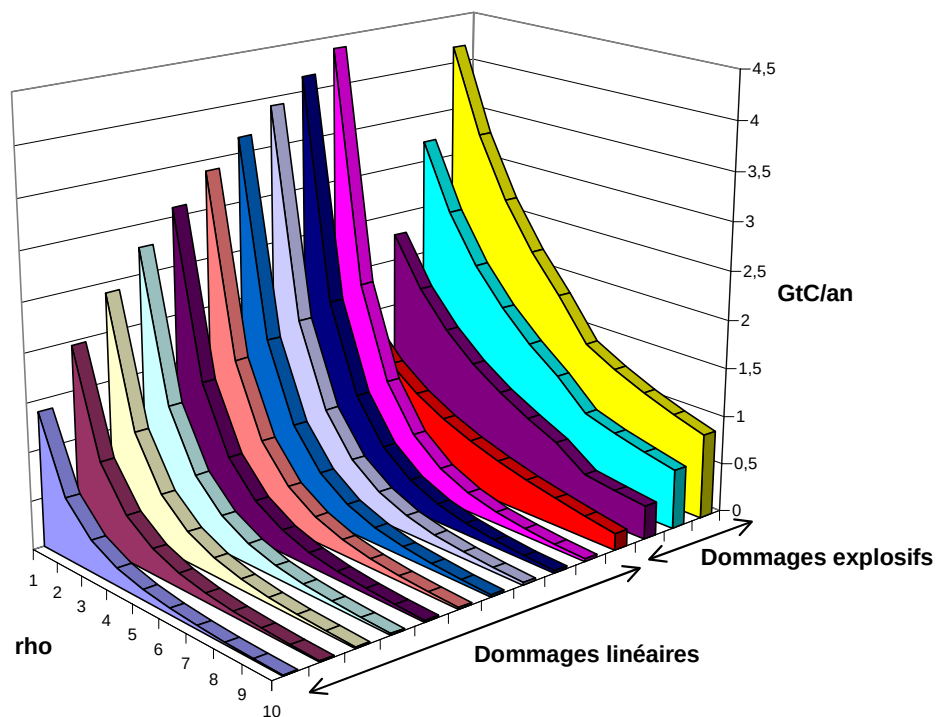


Figure 3.14 : Niveaux optimaux de réduction des émissions – Synthèse des cas linéaires et explosifs.

2.2.2. D'abord la nature de la fonction de dommages, puis ensuite le taux d'actualisation

Comparons maintenant l'impact de l'incertitude sur le niveau de dommages et de l'incertitude sur le taux d'actualisation sur la décision de court terme. Le tableau 3.1 résume les principaux résultats obtenus avec notre modèle. Nous observons que dans le cas de dommages linéaires, l'incertitude sur le taux d'actualisation prédomine : l'écart maximum de niveau d'abattement est ainsi de 1 à 3 en fonction du niveau de dommages, contre 1 à 5 en fonction du taux d'actualisation.

A l'inverse, dans le cas explosif, l'écart est de 1 à 3 en fonction du seuil de dommages contre 1 à 2 seulement en fonction du taux d'actualisation. C'est le niveau de dommages qui est déterminant pour la décision de court terme dans le cas explosif, alors que c'est la valeur du taux d'actualisation qui prime dans le cas linéaire.

Niveau d'abattement de première période			
Dommages linéaires			
ρ	σ	0,5%	5%
3%		0,33	1,044
6%		0,063	0,2
Niveau d'abattement de première période			
Dommages explosifs			
ρ	$\bar{\psi}$	750 ppm	450 ppm
3%		0,816	2,671
6%		0,432	1,401

Tableau 3.1 : Variation du niveau optimal de réduction des émissions de première période en fonction du taux d'actualisation et du niveau de dommages.

La question principale est donc d'abord de savoir quelle est la forme de la fonction dommages. Si celle-ci est linéaire, alors l'incertitude sur le taux d'actualisation est légèrement plus importante que l'incertitude sur le niveau de dommages σ . A l'inverse, si la fonction dommages est explosive, alors ce qui compte est la valeur du seuil de catastrophe $\bar{\psi}$ puis ensuite seulement le taux d'actualisation.

2.3. Incertitude sur la nature de la fonction de dommage

Que se passe-t-il maintenant si la nature même de la fonction de dommages est inconnue ? Pour ce faire, nous examinons la décision optimale lorsque deux fonctions de dommages sont possibles *ex ante*, linéaire ($\sigma=3\%$) ou explosive ($\bar{\psi}=550$ ppm, ce qui correspond à peu près à un seuil de danger de 450 ppm), et la manière dont celle-ci varie avec le taux d'actualisation.

Le résultat dépend bien entendu des probabilités subjectives attachées à chacune des fonctions de dommages possibles. Nous formulons ici cinq scénarios correspondant à cinq jeux de croyances différents. Dans le scénario a, toute hypothèse de catastrophe climatique est écartée, les dommages sont de manière certaine linéaires. Les scénarios b, c et d accordent tous trois une probabilité faible mais non nulle à la possibilité d'une catastrophe climatique. Le scénario e enfin, proposé ici comme point de comparaison, suppose *ex ante* que les dommages sont explosifs.

scénario	a	b	c	d	e
$p_{\text{linéaire}}$	1	0,95	0,90	0,85	0
p_{explosif}	0	0,05	0,10	0,15	1

Tableau 3.2 : Jeux de probabilités *ex ante* sur la nature des fonctions dommages.

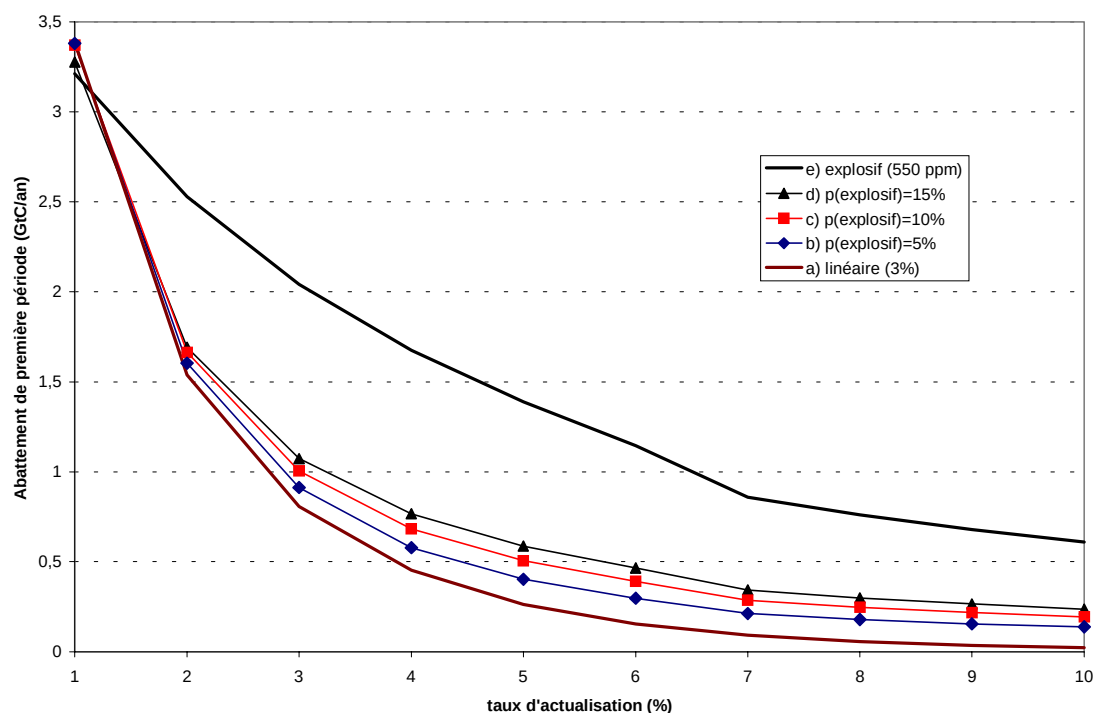


Figure 3.15 : Variation de l'abattement de première période en fonction du taux d'actualisation, pour différentes probabilités de dommages explosifs (p de 1 à 10%).

La figure 3.15 présente les niveaux optimaux de réduction des émissions de première période en fonction du taux d'actualisation pour les différents jeux de croyances *ex ante*. Nous observons en premier lieu que l'introduction d'une probabilité de catastrophe, même faible, entraîne un effort non nul au cours de la première période même si le taux d'actualisation est élevé. Pour un taux d'actualisation de 8%, c_1^* est multiplié par 3 lorsque nous passons du scénario a au scénario b, puis par 5 lorsque nous passons de a à d. En outre, même à des taux d'actualisation plus faibles, l'introduction d'une probabilité de catastrophe entraîne une augmentation non négligeable des efforts de première période. Cette augmentation dépasse 20% dès lors que le taux d'actualisation est supérieur ou égal à 3%.

Ces augmentations différenciées en pourcentage cachent une remarquable constance en volume. Dès lors que le taux d'actualisation est supérieur à 2%, les efforts de première période doivent augmenter de 100 et 150 MtC par an en passant de a à b, de 200 à 250 en passant de a à c et de 250 à 300 en passant de a à d. S'il faut rester très prudent sur ces chiffres issus d'un modèle particulièrement simplifié, le fait qu'ils restent constants avec le taux d'actualisation (pour des taux supérieurs à 3%) semble robuste. Notons à ce propos que l'augmentation en volume de c_1 est maximale pour des taux d'actualisation compris entre 3% et 6%, qui constitue la fourchette la plus couramment utilisée par les modélisateurs.

Le tableau 3.3 compare l'influence de l'incertitude sur la nature de la fonction dommages à l'incertitude sur le taux d'actualisation. Nous observons par contre que diviser par deux le taux d'actualisation multiplie par 5 le niveau optimal de réduction des émissions dans le cas linéaire, contre seulement 2,5 lorsque la probabilité d'une catastrophe est de 15%. L'introduction d'une probabilité même faible de dommages explosifs diminue donc radicalement l'impact d'une variation du taux d'actualisation sur la décision de court terme. Dans ce cas, c'est le seuil de ces dommages explosifs qui est déterminant pour l'action de première période.

ρ	P_{explosif}	0%	15%
3%		0,808	1,074
6%		0,155	0,466

Tableau 3.3 : Niveau optimal de réduction des émissions en fonction de la probabilité d'occurrence de dommages catastrophiques.

2.4. Incertitude sur la productivité marginale du capital de long terme

Nous avons jusqu'à présent considéré l'incertitude sur la valeur du taux d'actualisation de manière globale, sans distinguer entre l'influence du « taux de préférence pure pour le présent », celle de la forme de la fonction d'utilité et celle du taux de croissance à long terme de l'économie. Rappelons pourtant que dans un univers de premier rang, le taux d'actualisation est donné comme la somme d'un taux d'escompte social ou « préférence pure pour le présent » δ , et d'un terme d'effet richesse constitué comme le produit du taux de croissance à long terme et de l'élasticité temporelle de l'utilité marginale de la consommation (équation 3.34, voir la première section du premier chapitre).

$$\rho = \delta + g.v \quad (3.34)$$

Trois sources d'incertitudes distinctes concourent donc à faire de ρ un paramètre controversé. Nous nous proposons ici de les démêler. Nous faisons cependant l'hypothèse simplificatrice selon laquelle la fonction d'utilité de l'agent représentatif est logarithmique à chaque période en fonction de la consommation, ce qui implique $v = 1$. Nous examinons donc ici l'impact comparé du taux de croissance à long terme g et du « taux de préférence pure pour le présent » sur la décision de court terme en matière d'effet de serre.

Les émissions de CO_2 de seconde période ne sont pas indifférentes au taux de croissance à long terme. Le choix d'une élasticité PIB des émissions de CO_2 résulte cependant d'une combinaison d'hypothèses portant sur des paramètres aussi incertains que l'évolution des modes de consommation et sur le volume de l'activité d'une part (demande d'énergie) ou la vitesse du progrès technique et son "biais" vers la décarbonisation de l'autre (offre d'énergie) (Hourcade *et al.*, 1996c). Ces éléments étant fortement controversés, comme nous le reverrons en détail au chapitre 7, nous décidons de raisonner ici sur la base de trois scénarios qualitatifs décrits dans le tableau 3.4 ci-dessous⁷.

OPTIMISTE	Le progrès technique ainsi éventuellement que les modifications des modes de consommation l'emportent sur les effets volume : E_2 décroissant avec g .
PESSIMISTE	Le progrès technique et les changements de modes de consommation ne sont pas suffisants pour contrebalancer les effets volume : E_2 est croissant avec g .
NEUTRE	Les effets volume et progrès technique s'annulent pour produire les mêmes émissions quel que soit le taux de croissance : E_2 est constant.

Tableau 3.4 : Trois scénarios sur les liens entre émissions de seconde période et taux de croissance économique à long terme.

Nous introduisons ainsi une incertitude sur le taux de croissance futur, dont nous supposons qu'il prendra la valeur g_i avec une probabilité subjective *ex ante* p_i . Le modèle de décision en matière d'effet de serre est alors analogue à celui développé par Weitzman (1998). L'objectif reste de maximiser les niveaux d'abattement, mais cette fois-ci c'est l'indicateur de qualité environnementale qui est incertain, tout comme les facteurs d'actualisation à long terme (nous supposons que le taux de

⁷ En toute rigueur, il faudrait aussi faire varier les coûts de deuxième période c_2 en fonction du taux de croissance. Il y a d'ores et déjà un effet puisque ces coûts sont basés sur le pourcentage de réduction des émissions et non sur le montant d'abattement. Ce point reste à développer lors de travaux ultérieurs.

croissance sur la première période est quant à lui connu). Soit finalement le problème de décision suivant :

$$\text{Min}_{(a_1, a_2^i)} \quad \varphi_1 c_1(a_1) + \sum_i \varphi_2^i p_i c_2^i(a_2^i) + \sum_i \varphi_3^i p_i \theta \psi_i(a_1, a_2^i) \quad (3.35)$$

$$0 \leq a_1 \leq E_1 \quad (3.36)$$

$$0 \leq a_2^i \leq E_2(g_i) \quad (3.37)$$

$$\text{Avec } \rho_1 = \delta + g_1, \rho_2^i = \delta + g_i \quad (3.38)$$

$$\varphi = \frac{1}{1+\rho_1}, \varphi_1 = \frac{1-\varphi^n}{1-\varphi}, \varphi_{2i} = \frac{1}{1+\rho_2^i}, \varphi_2^i = \varphi_1^n \cdot \frac{1-\varphi_{2i}^{m-n}}{1-\varphi_{2i}}, \varphi_3^i = \varphi_1^n \cdot \varphi_2^{i \cdot m-n} \cdot \frac{1}{1-\varphi_{2i}} \quad (3.39)$$

Nous calibrons le modèle avec les hypothèses suivantes. Le taux de croissance de première période g_1 est fixé à 2,5% par an. Le taux de croissance de seconde période vaut 1,5%, 2,5% ou 3,5% avec probabilité 1/3 pour chacun de ces scénarios. Les émissions de première période E_1 sont de 196 GtC. Les émissions de seconde période sont données dans le tableau 3.5 suivant. Tous les autres paramètres sont fixés comme précédemment.

E(g)	g	1,5%	2,5%	3,5%
Optimiste		1504 GtC	1254 GtC	1004 GtC
Pessimiste		1004 GtC	1254 GtC	1504 GtC
Neutre		1254 GtC	1254 GtC	1254 GtC

Tableau 3.5 : Emissions de seconde période en fonction du taux de croissance à long terme et des hypothèses sur l'élasticité PIB des émissions de CO₂.

Trois paramètres restent ainsi libres : l'hypothèse formulée sur la décarbonisation, la nature de la fonction dommage et le « taux de préférence pure pour le présent ». Nous supposons ici que les émissions de seconde période dépendent uniquement de g et non de δ . Nous nous plaçons donc dans un monde dans lequel on imposerait aux politiques climatiques un taux de « préférence pure pour le présent » différent de celui de l'ensemble de l'économie. Nous avons bien insisté au premier chapitre sur les limites d'une telle approche, qui induit un biais artificiel pour l'investissement dans le domaine climatique. Nous adoptons cette représentation plus simple à formaliser dans cette section, en gardant présent à l'esprit que l'impact du « taux de préférence pure pour le présent » sur la décision de court terme s'en trouve augmenté.

La figure 3.16 présente les abattements optimaux de première période en fonction du « taux de préférence pure pour le présent », du niveau de dommages explosifs et des liens entre émissions de CO₂ et taux de croissance du PIB à long terme. Nous constatons à nouveau que le paramètre déterminant pour la décision de court terme est, dans ce cas de dommages explosifs, le montant des dommages. Viennent ensuite avec un impact à peu près similaire la valeur du « taux de préférence pure pour le présent » et l'hypothèse formulée sur la nature des liens entre émissions de CO₂ et taux de croissance.

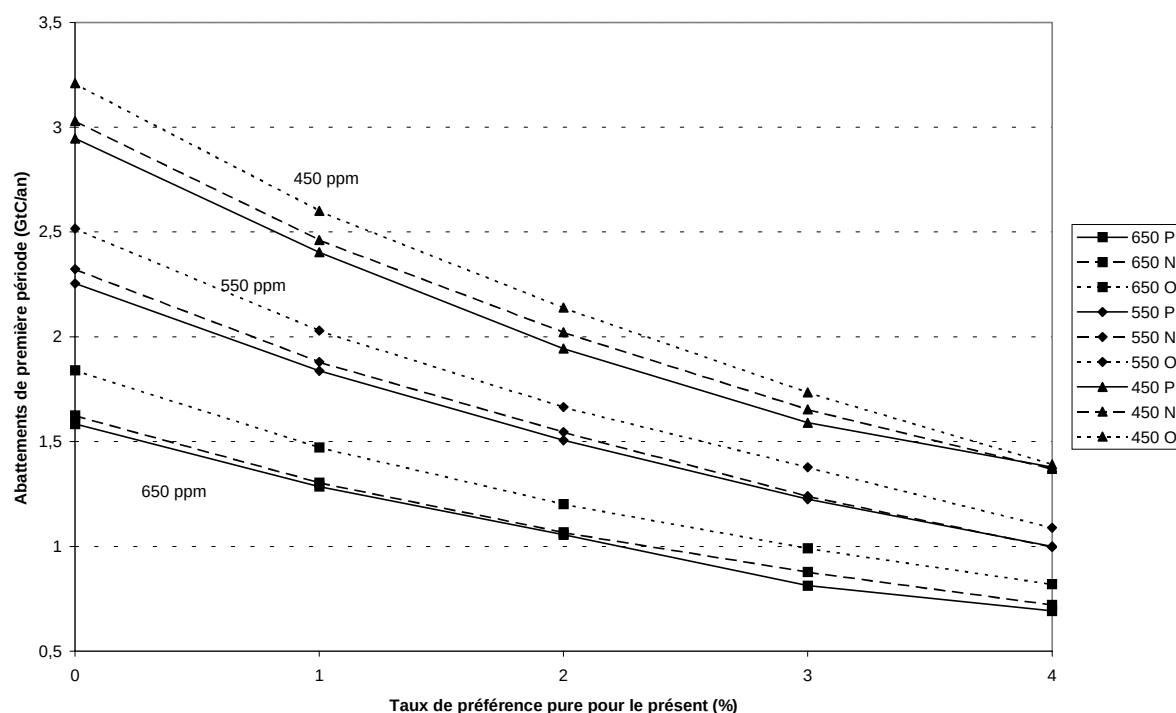


Figure 3.16 : Abattement optimal de première période en fonction du « taux de préférence pure pour le présent », du niveau de dommages explosifs et du scénario sur les liens entre émissions et croissance (δ entre 0 et 4%, $\bar{\psi}$ entre 450 et 650 ppm, scénario optimiste, pessimiste ou neutre).

Nous constatons par ailleurs que les abattements optimaux de première période sont plus élevés lorsque nous nous trouvons dans un scénario optimiste que lorsque nous nous trouvons dans un scénario pessimiste sur les liens entre croissance et émissions. La raison en est que le facteur d'actualisation est d'autant plus élevé que le taux de croissance est faible. De fait, dans l'équation (3.35), les dommages liés au scénario de plus faible taux de croissance sont ceux qui sont le plus valorisés. Or dans notre scénario « optimiste », c'est pour le taux de croissance le plus faible que les émissions sont les plus élevées, générant des risques de dommages importants. Dans le scénario « pessimiste » au contraire, les émissions sont élevées pour un taux de croissance élevé, ce qui du fait de l'actualisation a moins de poids dans le total des coûts actualisés. Nous retrouvons ainsi le résultat souligné par Weitzman (1998) selon lequel c'est ce qui se passe pour les taux de croissance futurs les plus faibles qui compte le plus pour la décision de court terme en matière de changement climatique.

Conclusion

Ce chapitre n'aura permis qu'une exploration très partielle de l'impact des incertitudes sur la décision de court terme en matière d'effet de serre. Il manque en effet un examen attentif des incertitudes liées aux coûts d'abattement (que notre modèle à deux périodes ne nous permettait malheureusement pas de bien prendre en compte), à l'inertie, au progrès technique ou encore à la date d'acquisition de l'information. Ce chapitre nous a simplement permis d'examiner en détail l'impact du taux d'actualisation sur la décision optimale de court terme, et de comparer cet impact à celui d'autres paramètres incertains. Les approches graphiques, analytiques et numériques concourent à nous montrer que la question clé est de savoir si oui ou non nous croyons qu'une catastrophe climatique est possible. La sensibilité de la décision optimale de court terme au taux d'actualisation est en effet subordonnée à la réponse qui y est apportée :

- Si nous faisons le pari qu'aucune catastrophe climatique n'est susceptible d'intervenir, au moins pour une plage raisonnable de concentrations, alors deux paramètres déterminent à égale

importance la décision de court terme : le taux d'actualisation et le niveau de dommages anticipé pour un doublement de la concentration atmosphérique en CO₂.

- Si par contre une catastrophe est considérée comme possible, même avec une probabilité faible, alors l'image change totalement. Le seuil de concentration à partir duquel cette catastrophe est susceptible d'intervenir devient le paramètre déterminant pour la décision de court terme, nettement devant la valeur du taux d'actualisation.

Ce résultat nous permet tout d'abord de réfléchir aux questions que l'économiste peut poser aux spécialistes du climat. Le fait que les dommages du changement climatique comptent pour la décision en matière climatique est un truisme. Mais ce résultat suggère que l'incertitude prioritaire porte plus sur la probabilité d'occurrence d'une catastrophe que sur les réactions moyennes du climat et des écosystèmes à l'accumulation des gaz à effet de serre dans l'atmosphère. Les travaux de ce chapitre demandent bien entendu à être complétés, mais il nous semble d'ores et déjà qu'ils peuvent aider à ouvrir des portes pour le dialogue entre les groupes I et III du GIEC.

En second lieu, cette analyse numérique nous conduit à relativiser l'impact du taux d'actualisation sur la décision de court terme en matière de changement climatique. Ce paramètre reste bien évidemment important, mais son influence est subordonnée à la nature linéaire ou explosive de la fonction de dommages. En outre, nos résultats suggèrent que l'incertitude liée à la « préférence pure pour le présent » et celle liée au taux d'actualisation ont une influence quasi identique. L'incertitude sur la forme de la fonction dommages apparaît ici prépondérante. En d'autres termes, la décision résulte d'un jeu combiné d'hypothèses sur la croissance économique future, la nature de la fonction dommage et en dernier lieu sur le choix de la « préférence pure pour le présent ». Ce modèle à un agent et à un bien suggère ainsi que le débat entre court terme et long terme renvoie à un arbitrage plus large entre différentes « visions du monde ». Mais il suggère aussi que pour étudier le contenu de ces « visions du monde », il est nécessaire de développer le cadre étroit d'un seul bien et d'un seul secteur. Nous nous y employons dans la seconde partie de ce travail.

Premier entracte

Parvenus au terme de cette première partie, il est utile de reprendre un peu notre souffle et de revenir sur les enseignements que nous avons pu en tirer. Face à la complexité des problèmes posés par le changement climatique global et à la multiplicité des discours qui s'y rapportent, nous avons choisi de commencer notre chemin à l'aide d'un petit modèle très simple et très agrégé d'évaluation des politiques climatiques. Malgré son manque évident de réalisme, cet outil présente l'intérêt de faire porter l'attention sur les paramètres cruciaux pour la décision.

A ce niveau, l'incertitude apparaît comme un élément clé de la décision en matière de changement climatique. Le nombre des paramètres controversés et l'ampleur des marges d'incertitude nous obligent en effet à abandonner toute ambition de décider une fois pour toute. Nous passons d'une conception balistique de la décision au tâtonnement caractéristique d'une stratégie de décision séquentielle. Dans ce contexte très incertain, les modèles numériques ne sont pas à même d'apporter de réponse définitive, mais ils permettent, nous l'avons vu, d'éclairer le débat en identifiant les controverses réellement significatives pour la décision de court terme.

L'impact du taux d'actualisation sur les politiques climatiques se révèle en particulier très ambigu. Les trajectoires optimales de coûts de réduction des émissions obtenues avec STARTS présentent en effet un « pic » de coûts dont la valeur peut être très élevée. Or cette distribution temporelle des efforts apparaît, certes à des niveaux différents, quelle que soit la valeur du taux de « préférence pure pour le présent ». En second lieu, le taux d'actualisation ne s'avère décisif pour la décision de court terme que si nous faisons le pari qu'il n'y aura pas de catastrophe climatique. Dans le cas contraire, c'est le niveau du seuil de danger qui se révèle être, devant l'actualisation, le paramètre le plus important.

Nous observons ainsi un écart très net entre l'influence numérique du taux d'actualisation sur la décision et ce que l'ampleur des controverses que ce paramètre soulève pourrait laisser penser de prime abord. Un tel décalage est loin d'être anecdotique, car l'actualisation est en général considéré comme le paramètre clé tant pour déterminer tant l'ampleur que la distribution temporelle des efforts de lutte contre l'effet de serre. Si tel n'est plus le cas, par quoi remplacer ce paramètre ?

Pour répondre à cette question, il nous faut revenir aux fondements théoriques des outils que nous avons manipulés. Nous avons déjà vu que, dans un modèle normatif de premier rang, le taux d'actualisation se décompose en la somme d'un « effet richesse » et d'un taux d'escompte social. L'origine du premier terme est claire : il dépend d'hypothèses formulées sur le taux de croissance et sur les préférences des agents futurs. Nous reviendrons en détail sur les fondements théoriques du second, que nous serons finalement conduit à réinterpréter comme un « taux de préférence pour le non sacrifice du présent » dont la valeur ne saurait être modifiée à la légère (chapitre 5).

Cette conclusion laissera cependant sans réponse la question principale : qu'est ce qu'une politique « équitable » vis-à-vis de nos descendants lorsque les décisions prises aujourd'hui sont explicitement révisables dans le futur ? Nous verrons au chapitre 6 que, dans une trajectoire de décision séquentielle, le problème n'est plus d'arbitrer entre coûts aujourd'hui et coûts demain, mais entre coûts aujourd'hui et le contenu de ce que nous laissons en héritage nos enfants, contenu qu'il faut décrire en termes de richesse économique et environnementale, mais aussi de flexibilité ou d'inerties et de risques environnementaux.

Expliciter la nature de l'héritage impose de dépasser les limites du modèle simple que nous avons manipulé jusqu'à présent. Pour discuter de l'inertie et de la flexibilité, nous avons déjà ressenti le besoin de passer de un à plusieurs biens. Mais il faudra aussi nous demander comment les agents se coordonnent pour décider d'un héritage, et à qui il revient. De ce fait, il nous faudra abandonner aussi la fiction d'un monde à un seul agent représentatif par génération.

Nous y consacrerons le chapitre 4, en vérifiant par la même occasion sous quelles conditions l'hypothèse de séparabilité entre les distributions spatiales et temporelles des coûts des politiques climatiques que nous avons formulée implicitement dans toute cette première partie est valide. Pour ce faire, nous étendrons le modèle de répartition des coûts du financement d'un bien public développé par Howard Bowen, Erik Lindhal et Paul Samuelson dans le cadre d'un bien public futur et incertain comme le changement climatique.

Seconde Partie

Les enjeux distributifs des politiques climatiques : vers une réflexion sur le contenu de l'héritage

Chapitre 4 Séparabilité des distributions spatiales et temporelles des coûts d'abattement

La qualité du climat de la planète présente à l'évidence toutes les caractéristiques d'un bien public global : personne ne peut être empêché d'en profiter (non-exclusivité) et le nombre de personnes qui en profitent n'est pas limité (non-rivalité) (Nordhaus, 1999). Elle se singularise néanmoins par trois traits distinctifs : il s'agit en effet d'un bien public futur, incertain et produit de manière décentralisée.

- Le bien public est futur car il existe un décalage temporel très important entre les émissions de gaz à effet de serre et leurs impacts sur les individus : ce sont seulement les générations futures qui feront l'expérience du changement climatique. De fait, la quantité de bien public qu'il est souhaitable de produire dépend de la nature des arbitrages entre génération présente et générations futures.
- Le bien public est « incertain » en ce sens que la liaison entre quantité de bien public produite et bien-être des individus n'est pas ou mal connue du fait des incertitudes sur la forme des fonctions dommages, mais aussi sur les coûts d'abattement ou sur les trajectoires de référence. Le montant du bien public à produire devient ainsi dépendant de paramètres tels que les croyances des agents sur les risques futurs, comme de l'aversion au risque de chacun d'entre eux.
- Le bien public est enfin produit de manière décentralisée car il n'existe pas une fabrique unique de gaz à effet de serre mais une multiplicité de sources contrôlées par un très grand nombre d'agents publics ou privés dans l'ensemble des pays du monde. Il faut donc s'interroger sur les liens entre contributions individuelles au financement du bien public et productions individuelles de ce même bien.

C'est cette dernière question qui a mobilisé le plus l'attention des économistes. Graciela Chichilnisky, Geoffrey Heal et David Starrett (1993, 1994, 1999) ont en effet montré que dans le cas d'un bien public produit de manière privée, l'optimum de premier rang ne pouvait être décentralisé par un marché de permis d'émissions négociables que pour une unique distribution initiale des droits d'émissions. En ce sens très précis, et contrairement à ce que pourrait laisser penser une généralisation trop rapide de la seconde loi du bien-être, équité et efficacité ne peuvent plus être séparées.

Dans le contexte du débat sur le choix des instruments économiques à utiliser pour mettre en œuvre les politiques climatiques, ce résultat a suscité une importante controverse. Oliveira Martins et Sturm (1996) montrent qu'il n'est plus valable si la contrainte de limitation des émissions est imposée à des agents dont la fonction d'utilité ne comprend pas de préférence explicite pour l'environnement. Chao et Peck (2000) soulignent quant à eux numériquement qu'une fois le montant total de permis fixé au niveau donné par l'optimum de premier rang, l'équilibre de marché obtenu reste très proche de cette référence optimale quelle que soit la distribution initiale des droits.

Nous argumentons dans ce chapitre que le fait que le bien public climat soit futur introduit autant sinon plus de difficultés que le fait qu'il soit produit de manière décentralisée. Cette nouvelle caractéristique impose en effet de prendre en compte simultanément les arbitrages intra et inter générationnels. Toute la question est alors de déterminer la force de ce lien, en analysant les conditions dans lesquelles les distributions des efforts de financement du bien public au sein d'une génération et entre générations peuvent être séparées.

Nous commençons par considérer le problème du financement optimal d'un bien public futur en univers certain. Nous étendons ainsi au cas intertemporel le modèle dit de Bowen, Lindhal et Samuelson¹, construit pour examiner l'équilibre de production d'un bien public « présent ». Nous verrons alors que la nature de l'équilibre, et la séparation entre distributions spatiales et temporelles des coûts d'abattement dépendent essentiellement de la manière dont l'utilité des générations futures est prise en compte dans la fonction d'utilité collective. Nous introduisons dans une seconde section l'incertitude, dont nous verrons qu'elle ne modifie pas radicalement les conclusions obtenues auparavant.

Nous considérerons dans tout ce chapitre un bien public produit de manière centralisée, ce qui revient dans le cas du changement climatique à déconnecter financement et action en postulant, par exemple, l'existence d'un fonds carbone international alimenté par les contributions individuelles des différents Etats et qui finance ensuite les projets d'abattement par ordre de coûts croissants. Nous formulons cette hypothèse simplificatrice dans la mesure où le problème posé par un bien public produit de manière décentralisée concerne la possibilité de décentralisation de l'optimum de premier rang, ce qui est ici au-delà de notre propos².

1. Principes normatifs de partage de la charge en univers certain

1.1. Cadre d'analyse du bien public futur « qualité de l'atmosphère »

Le problème dit de Bowen, Lindhal et Samuelson (BLS) est le suivant : soit un monde dans lequel les agents consomment un bien privé mais dont le bien-être dépend aussi de la quantité d'un bien public qu'ils peuvent contribuer à produire en sacrifiant une part de leur consommation³. Toute la question est de déterminer le niveau de bien public à produire qui maximise le bien-être collectif. La réponse consiste à dire qu'il faut produire du bien public jusqu'à ce que le coût marginal de production soit égal à la somme des disponibilités marginales à payer pour le bien public de l'ensemble des individus considérés. De plus, la contribution de chaque individu est calculée de telle sorte que les utilités marginales de la consommation après contribution soient égalisées.

1.1.1. Equilibre budgétaire

Nous développons ici une variante du problème BLS dans le cas d'un problème de décision à deux périodes. Soit un monde divisé en N régions indépendantes (indexées par un entier i variant de 1 à N) qui interagissent dans un environnement commun menacé par les émissions de gaz à effet de serre. L'individu représentatif⁴ des l_i habitants de la région i alloue ses revenus par tête y_i à la période présente (respectivement y_i^f à la période future) entre sa consommation c_i d'un bien composite choisi comme numéraire et ses dépenses d'abattement a_i (resp. c_i^f et a_i^f). Les revenus par tête étant supposés donnés *ex ante*, nous obtenons les $2N$ équations d'équilibre budgétaire suivantes :

$$y_i = c_i + a_i \quad \text{et} \quad y_i^f = c_i^f + a_i^f \quad \forall i \in \{1, \dots, N\} \quad (4.1)$$

¹ Ce modèle a été développé dans un cadre d'équilibre partiel par Howard Bowen (1943) et Erik Lindhal (1919), puis étendu à un cadre d'équilibre général par Samuelson (1954).

² Ce chapitre est essentiellement basé sur un travail de recherche entrepris avec Jean-Charles Hourcade et présenté à une réunion d'experts de l'IPCC (Hourcade et Lecocq, 1999), à un colloque organisé conjointement par l'IIASA, l'EMF et l'AIE et au colloque du PIREE (Lecocq, Hourcade et Le Pesant, 1999). Nous remercions William Nordhaus, Cédric Philibert, Sylviane Gastaldo et Tarik Tazdaït pour leurs précieux commentaires sur les différentes versions de ce texte.

³ Nous pouvons illustrer ce cas par l'exemple, tiré du cours de microéconomie de l'environnement de Sylviane Gastaldo (1995), d'un lac dont les riverains seraient sensibles à la propreté, mais tireraient leurs revenus du partage des bénéfices de l'usine polluante.

⁴ Nous ne nous préoccuperons pas ici des questions distributives internes à chaque pays.

Nous désignons par x_i (resp. x_i^f) le niveau de réduction d'émissions effectué par chaque pays grâce à l'ensemble de toutes les contributions individuelles a_i . Nous notons x (resp. x^f) la somme des x_i sur l'ensemble des pays. La somme de tous les abattements présents et futurs $x+x^f$ constitue un indicateur de la qualité globale de l'atmosphère⁵. Nous notons $C_i(x_i)$ (resp. $C_i^f(x_i^f)$) les fonctions de coûts d'abattement régionales. Ces fonctions résument à la fois les coûts des technologies actuelles de réduction des émissions ainsi que nos anticipations sur le progrès technique futur.

Nous nous limitons à un bien public produit de manière décentralisée : nous considérons donc à chaque période une fonction de coûts d'abattement agrégée $C(x)$ construite de telle manière qu'elle optimise l'efficacité environnementale de la somme de toutes les cotisations régionales a_i ⁶. Nous obtenons finalement les équations de coûts suivantes :

$$\sum_i l_i \cdot a_i = C(x) \qquad \sum_i l_i^f \cdot a_i^f = C^f(x^f) \qquad (4.2)$$

Nous notons enfin $d_i(x+x^f)$ les dommages dus au changement climatique pour la région i . Nous supposons que ces dommages se font sentir uniquement au cours de la période future, mais nous faisons dans cette première section l'hypothèse que leur ampleur est connue dès aujourd'hui avec certitude. Dans ce modèle très agrégé, les dommages d_i représentent uniquement des dommages marchands qui viennent en déduction du revenu futur. En présence des dommages, les équations budgétaires futures sont donc modifiées de la façon suivante :

$$y_i^f - d_i(x+x^f) = c_i^f + a_i^f \qquad \forall i \qquad (4.3)$$

1.1.2. Fonction de bien-être social : solidarité universelle contre solidarité dynastique

Nous nous intéressons à la quantité de bien public produite et à la répartition des coûts de cette production dans le cadre d'un équilibre coopératif entre les différentes régions. Pour calculer cet équilibre, nous introduisons une fonction de bien-être social construite comme la somme pondérée des utilités de la consommation des générations présentes et futures de chaque région. Le programme d'abattement qui maximise cette fonction est identique à celui qui résulterait d'un jeu coopératif dans lequel le pouvoir de négociation de chaque région serait donné par le poids qui lui est affecté dans la fonction de bien-être social.

La fonction de bien-être social peut aussi être interprétée à l'aide de la métaphore du planificateur central. Tout se passe en effet comme si un planificateur omniscient et omnipotent décidait de l'allocation des ressources disponibles pour l'abattement de façon à maximiser la fonction de bien-être social. Nous utiliserons cette métaphore à plusieurs reprises dans le texte, tout en soulignant que son emploi ne préjuge en rien de la nature des institutions économiques (planification ou marché) qui sont mobilisées pour assurer la traduction concrète de l'équilibre.

La traduction directe du modèle de Bowen, Lindhal et Samuelson au cas d'un bien public futur suppose de tenir compte de la manière dont sont prises en compte les générations futures par les générations présentes. Deux problèmes sont ici conjointement soulevés : celui du poids relatif des utilités des générations futures et des générations présentes, et celui de l'arbitrage par chaque agent entre ses propres descendants et le reste de l'humanité future. Nous négligerons le premier dans ce

⁵ La logique du raisonnement que nous nous proposons de mener dans ce chapitre ne dépend pas de la manière dont la cible environnementale est définie (plafond de concentration, limite en température, etc.). Nous pouvons donc adopter ici sans perte de généralité une définition très frustre de la qualité de l'atmosphère.

⁶ Le mécanisme représenté ici peut être interprété de la manière suivante : les différentes régions cotisent à un fonds carbone. Ce fonds finance ensuite des politiques de réduction des émissions de gaz à effet de serre là où les coûts sont les moins élevés. La fonction de coûts agrégée $C(x)$ se déduit donc des fonctions de coûts régionales de la manière suivante : $C(x) = \sum_i C_i(x_i)$ sous contrainte de $\sum_i x_i = x$ et de $C'(x_i) = C'(x_j)$ pour tout i et j .

chapitre, en supposant que chaque région est dotée d'un « taux de préférence pure pour le présent » identique. Il nous reste à examiner le second.

S'il est clair que les individus font à court terme une distinction entre leurs descendants directs et ceux des autres⁷ (Sen, 1967), que peut-on dire de cette distinction à plus long terme ? En ce qui concerne le temps caractéristique du changement climatique, à savoir le siècle, les auteurs sont partagés : Schelling (1995) souligne qu'à un tel horizon les individus sont indistincts, alors que Nordhaus et Yang (1996) construisent leur modèle régionalisé en supposant que chaque région optimise à long terme son propre niveau de consommation⁸.

Il ne nous appartient pas ici de trancher une question qui, du point de vue positif, relève de l'observation des comportements, et, du point de vue normatif, renvoie à une interrogation morale ayant d'importantes implications pour la définition du développement durable. Nous considérerons simplement deux cas de figure polaires selon que chaque région se préoccupe du sort de l'humanité future toute entière (solidarité universelle) ou en priorité de ses propres descendants (solidarité dynastique).

En « solidarité universelle », nous considérons que du fait des incertitudes sur la distribution géographique des impacts⁹, parce que les gens ont conscience du fait qu'*in fine* tout impact significatif en un point quelconque du globe affectera la sécurité de la planète toute entière, ou sur la base d'un principe de « bonhomie universelle », chaque région ne se préoccupe pas de savoir qui bénéficiera finalement de ses propres dépenses de réduction des émissions. Pour respecter la symétrie de traitement entre tous les individus de la génération future, nous supposons que chaque région ne se préoccupe que de sa propre consommation, et confère au planificateur le soin de prendre en compte également tous les individus futurs. Tout se passe dans ce premier cas comme si les générations futures étaient présentes autour de la table au même titre que les générations présentes, à la différence près toutefois que les utilités des générations futures restent actualisés au moyen d'un « taux de préférence pure pour le présent » positif.

La fonction d'utilité sociale W se présente alors sous la forme (4.4) suivante, où les α_i sont les poids affectés aux utilités des individus représentatifs de chaque région pour la génération présente, et les β_i les poids affectés aux utilités des individus représentatifs de chaque région pour la génération future. Nous introduisons explicitement les populations l_i et l_i^f pour bien distinguer les effets liés à la taille des populations des poids de négociation *stricto sensu*.

$$W = \sum_i l_i \cdot \alpha_i \cdot U_i(c_i) + \sum_i l_i^f \cdot \beta_i \cdot U_i^f(c_i^f) \quad (4.4)$$

En « solidarité dynastique », nous considérons au contraire que chaque région se préoccupe en priorité du bien-être de ses propres descendants. Nous traduisons ce point de vue en supposant que l'arbitrage entre consommation de la génération présente et consommation de la génération future est réalisé directement par l'individu représentatif de chaque région. Tout se passe maintenant comme si les « individus représentatifs » présents de chaque région s'asseyaient autour de la table de négociation et ayant chacun dans leur tête leur propre arbitrage entre leur propre consommation présente et celle de leurs descendants. La fonction d'utilité sociale s'écrit dans ce second cas sous la forme (4.5) suivante, où les W_i sont les fonctions d'utilité intertemporelles pour chaque région :

$$W = \sum_i l_i \cdot \alpha_i \cdot W_i(c_i, c_i^f) \quad (4.5)$$

⁷ Ceux-ci étant eux-mêmes divisés entre ceux des proches (même famille, même pays) ou des plus lointains.

⁸ Il faut cependant noter que ce modèle se place clairement dans l'optique d'un équilibre non coopératif entre les différentes nations du monde.

⁹ Nous nous trouvons alors dans une situation analogue au « voile de l'ignorance » décrit par John Rawls (1971).

1.1.3. Objectif du planificateur : coûts bénéfiques contre coûts efficacité

Nous avons vu dans le chapitre 1 que, du fait des incertitudes sur l'ampleur du changement climatique et sur la nature des dommages pour les économies futures, deux approches de la décision coexistent en matière d'effet de serre. Dans un raisonnement coûts avantages, l'objectif est de déterminer un programme d'abattement qui équilibre dommages et coûts d'abattement. En univers coûts efficacité au contraire, l'objectif environnemental est donné *a priori* et l'analyse économique a pour objectif plus modeste de trouver les moyens d'atteindre cette cible au moindre coût.

Il serait cependant trompeur de trop insister sur la différence entre les raisonnements coûts efficacité et coûts bénéfiques. Dans le premier cas la cible environnementale est certes donnée de manière exogène, mais il est clair qu'un arbitrage aura tout de même lieu entre les coûts et les bénéfices (ou du moins l'anticipation des risques climatiques) de la cible retenue. Autrement dit, si une Conférence des Parties propose un accord qui implique des charges excédant le consentement à payer de certains acteurs, un tel accord a alors peu de chances d'être accepté ou, s'il est accepté, a peu de chances d'être effectivement ratifié et mis en œuvre.

Comme nous l'avons dit au chapitre 1, la différence entre l'analyse coûts efficacité et l'analyse coûts bénéfiques tient donc plutôt au fait que dans le second cas, une traduction plus complète et systématique des impacts du changement climatique en termes monétaires est nécessaire. En pratique cependant, le langage de négociation dominant dans les prochaines années restera certainement le coûts efficacité dans la mesure où la question importante est aujourd'hui de savoir comment minimiser les coûts de réduction des émissions pour atteindre les objectifs de Kyoto. Nous examinerons donc ici les deux cas de figures :

- En coûts bénéfiques, le planificateur a pour objectif de déterminer le niveau de qualité environnementale $x+x^f$ ainsi que la distribution des dépenses d'abattement présentes a_i et futures a_i^f qui maximisent la fonction d'utilité sociale, soit :

$$\text{Max}_{a_i, a_i^f, x, x^f} W \quad (4.6)$$

- En coûts efficacité, le niveau minimum de réduction des émissions $\bar{x}$ est donné, et le planificateur n'a plus pour objectif que de trouver les niveaux d'abattement à chaque période a_i et a_i^f qui maximisent la fonction d'utilité sociale, soit :

$$\text{Max}_{a_i, a_i^f} W \quad \text{sous contrainte } x + x^f \geq \bar{x} \quad (4.7)$$

Notons qu'en univers coûts efficacité, il n'est plus nécessaire de prendre en compte les dommages du changement climatique. De deux choses l'une en effet : soit le seuil d'émissions est fixé de telle sorte que les dommages soient négligeables devant les revenus futurs (suivant en cela la lettre de la Convention Cadre sur le Changement Climatique), soit il subsiste une quantité non nulle de dommages, mais ceux-ci sont intégrés dans le revenu futur.

1.1.4. Retour sur la prise en compte du bien public « qualité de l'atmosphère » dans notre modèle

Dans le modèle BLS, le bien public est supposé intervenir directement dans les fonctions d'utilité individuelles. Les agents présentent donc des préférences pour l'environnement au même titre qu'ils ont des préférences pour la consommation. Dans le cadre que nous venons de présenter au contraire, la qualité de l'atmosphère symbolisée par le paramètre x n'intervient pas directement dans la fonction de bien-être des agents. Elle joue uniquement *via* la fonction de dommages pour réduire le revenu disponible à la période future.

Ceci ne veut pas dire que nos agents représentatifs ne se préoccupent pas de la qualité de l'atmosphère. La génération future, nous venons de le voir, y est sensible en ce sens qu'elle en subit les dommages sur sa propre consommation. La génération présente l'est aussi dans la mesure où elle se préoccupe du bien-être de ses descendants, ce qu'elle fait soit directement région par région avec une fonction d'utilité à deux composantes (solidarité dynastique), soit en donnant pour mission à un planificateur mondial de prendre une décision tenant compte des risques pour l'ensemble des générations futures. Cette approche permet simplement d'éviter la difficile question de la révélation des préférences pour l'environnement (cf. chapitre 1) et de mieux mettre en lumière un aspect crucial des biens publics futurs, à savoir le rôle joué par la substitution entre consommation présente et consommation future.

1.2. « Solidarité universelle » : quand distributions spatiales et temporelles des coûts peuvent être séparées

1.2.1. Pondération des utilités dans la fonction d'utilité sociale

a) Pondération des utilités au sein de chaque génération

Si les utilités marginales sont décroissantes, les coûts marginaux d'abattement croissants et les dommages marginaux croissants, alors il existe une infinité (de dimension $2N-1$) de distributions (a_i, a_i^f) optimales au sens de Pareto, c'est-à-dire telles que l'utilité d'un agent ne puisse être augmentée sans diminuer strictement l'utilité d'au moins un autre agent. Il existe de plus une relation bi-univoque entre tout équilibre de Pareto et toute distribution des poids (α_i, β_i) définie à un facteur multiplicatif près dans la fonction d'utilité sociale. De fait, choisir un jeu de poids (α_i, β_i) revient à retenir un optimum de Pareto parmi l'ensemble de tous les équilibres possibles.

Un point de vue largement partagé tant par les économistes que par les non économistes consiste à penser que ce choix relève essentiellement de considérations éthiques, morales ou politiques sur lesquelles l'économiste en tant que tel n'est pas légitime pour prendre position. Il conviendrait donc qu'il s'en éloignât le plus possible, en laissant par exemple les paramètres α_i et β_i indéterminés. Nous retrouvons ici un débat fort ancien, puisque l'élaboration de cette doctrine remonte aux années 30 et à la critique de la comparaison interpersonnelle des utilités adressée par Lionel Robbins à Arthur Pigou¹⁰ (Dobb, 1972).

Cette approche prudente serait suffisante si notre seul objectif était d'examiner les conditions de la séparabilité entre les distributions temporelles et spatiales des coûts des politiques climatiques. Cependant, notre analyse ne prend sens que si elle permet de déboucher sur des règles de distribution des efforts raisonnablement acceptables par les différentes Parties. Dans le cas contraire en effet, nous aurions simplement montré que le formalisme que nous manipulons n'est pas du tout adapté pour réfléchir à la question de la distribution internationale des efforts de réduction des émissions, ce qui limiterait singulièrement la portée des conditions de séparabilité que nous pourrions éventuellement mettre en évidence.

Nous choisissons les poids α_i (resp. β_i) de telle sorte que la distribution initiale des revenus y_i (resp. y_i^f) soit considérée comme « optimale » par le planificateur en ce sens que même s'il le pouvait, c'est-à-dire même s'il était autorisé à réaliser des transferts forfaitaires entre régions, il laisserait cette distribution intacte. Il ne s'agit pas de porter ici quelque jugement de valeur que ce soit sur l'état actuel ou futur de la distribution des richesses, mais simplement de traduire le fait qu'il est très improbable que les politiques climatiques puissent être, aujourd'hui comme demain, l'occasion d'une

¹⁰ Dans son *Economics of Welfare* (1920), Pigou présente en effet une théorie du bien-être social fondée sur la possibilité de comparaison entre les différences d'utilité. La possibilité d'une telle comparaison fut pourtant fortement critiquée dans les années 30, en particulier par Robbins (1938). Le résultat de cette controverse a été de limiter le champ d'action de l'économiste à la seule notion d'optimum de Pareto (Sen, 1987, p.35).

redistribution internationale des richesses, sauf à supposer de fortes asymétries d'information ou des pouvoirs de négociation très différenciés¹¹.

La seule manière d'aller au-delà de ce jugement pessimiste mais malheureusement réaliste consiste à supposer qu'une part importante du double dividende généré par les politiques climatiques est réallouée aux pays en voie de développement. Si la politique considérée n'est pas un simple déplacement le long de la frontière des optimum de Pareto possibles, mais permet de dégager un surplus, alors la répartition de ce surplus n'a aucune raison d'être conforme à la distribution initiale des revenus (Guesnerie, 1995, Hourcade *et al.*, 1996c).

La traduction mathématique de cette condition d'optimalité *ex ante* est donnée par le théorème de Negishi (1960), qui stipule que dans un monde comprenant n biens, m consommateurs et p producteurs, il existe à un facteur multiplicatif près une unique distribution de poids des utilités individuelles dans la fonction d'utilité collective telle que l'équilibre résultant de la maximisation de cette fonction soit identique à l'équilibre issu de la mise en place d'un marché parfait entre chacun de ces agents et correspondant à leur dotation initiale en biens. Les « poids de Negishi » sont alors égaux, à un facteur de proportionnalité près, à l'inverse de l'utilité marginale du revenu (4.8 et 4.9). En particulier, si les fonctions d'utilité sont logarithmiques, alors les poids de Negishi sont proportionnels au revenu par tête de la région considérée.

$$\alpha_i = \frac{\alpha}{U_i'(y_i)} \quad \text{avec } \alpha > 0 \quad (4.8)$$

$$\beta_i = \frac{\beta}{U_i^f'(y_i^f)} \quad \text{avec } \beta > 0 \quad (4.9)$$

b) Pondération des utilités entre générations

Dans un schéma de « solidarité universelle », nous supposons que les individus présents souhaitent traiter indistinctement l'ensemble des individus futurs quelle que soit leur nationalité pour ce qui est du problème climatique. Cette volonté est suffisamment forte pour se traduire par une complète délégation de la prise en compte des agents futurs à une instance internationale. En conséquence logique de cette démarche, le planificateur fixe un facteur d'actualisation unique pour l'ensemble de l'humanité : le rapport β/α de notre modèle. Le facteur d'actualisation dont il s'agit ici correspond bien à un taux d'actualisation et non à un taux d'escompte social. En effet, en remplaçant les poids α_i et β_i par leurs valeurs, la fonction de bien-être social en « solidarité universelle » (4.1) s'écrit maintenant :

$$W = \sum_i l_i \cdot U_i(c_i) \cdot \frac{\alpha}{U_i'(y_i)} + \sum_i l_i^f \cdot U_i^f(c_i^f) \cdot \frac{\beta}{U_i^f'(y_i^f)} \quad (4.10)$$

Plaçons nous un instant dans le cas d'une seule région ($N=1$) et d'une population constante au cours du temps ($l_i=l_i^f$). La fonction de bien-être social (4.10) est alors équivalente à (4.11) ci-dessous (au sens où tout programme d'abattement qui la maximise, maximise aussi 4.11).

¹¹ Azar (1999) écrit pour s'opposer au choix de poids fonction de la distribution initiale des richesses que : « *The global welfare function is a normative, not an empirical question, and few would contest that the world would actually be a much better place if the huge differences income were reduced. A situation where the richest billion people live in abundance, and the poorest billion suffer from chronic hunger, can by no reasonable standards be considered a global welfare maximum.* » (p.254). Nous partageons ce point de vue. Mais, contrairement à l'analyse entièrement normative menée par Azar, nous recherchons ici une règle d'allocation des coûts d'abattement qui ait une chance raisonnable d'être acceptée dans un processus de négociation.

$$W = U(c) + \left(\frac{\beta}{\alpha} \frac{U'(y)}{U'(y^f)} \right) U^f(c^f) \quad (4.11)$$

Or la fonction de bien-être social que nous avons employée dans le modèle de croissance décrit au chapitre 1 (et sur laquelle nous aurons longuement l'occasion de revenir au chapitre suivant) est de la forme suivante, où δ est le taux d'escompte social ou le « taux de préférence pure pour le présent » et n est la durée en années de la période présente :

$$W = U(c) + \frac{1}{(1+\delta)^n} U^f(c^f) \quad (4.12)$$

En identifiant les formules (4.11) et (4.12), nous obtenons finalement (4.13), où ρ est un taux d'actualisation.

$$\frac{\beta}{\alpha} = \frac{U^f(y^f)}{U'(y)} \frac{1}{(1+\delta)^n} \approx \frac{1}{(1+\rho)^n} \quad (4.13)$$

Les taux d'actualisation des différentes régions peuvent bien entendu diverger du fait de différences de taux de croissance et/ou des préférences des agents. Le choix d'un taux d'actualisation commun pour la décision en matière d'effet de serre relève alors d'une négociation dont nous supposons ici que le résultat nous est donné sous la forme d'une valeur de ρ . Le modèle que nous construisons ici est en effet trop simple pour discuter de ce qui pourrait être le « bon » choix d'un taux d'actualisation commun pour le planificateur, dans la mesure où il n'explicite pas les raisons pour lesquelles à long terme les taux d'actualisation (et donc les productivités marginales du capital et les taux d'épargne) restent différents. Pour ce qui est de ce chapitre, nous choisissons simplement :

$$\frac{\beta}{\alpha} = (1+\rho)^{-n} = \varphi^n \quad (4.14)$$

1.2.2. « Solidarité universelle » dans un cadre coûts efficacité

Dans le cadre coûts efficacité, la quantité totale de bien public à produire est donnée *ex ante*, et il ne reste plus au planificateur qu'à répartir les contributions dans le temps et dans l'espace. Le problème de choix se pose alors de la manière suivante :

$$\text{Max}_{a_i, a_i^f} \quad W = \sum_i l_i \alpha_i U_i(c_i) + \varphi^n \sum_i l_i^f \beta_i U_i^f(c_i^f) \quad (4.15)$$

$$\text{s.c. } a_i \geq 0 \quad a_i^f \geq 0 \quad \forall i \in \{1, \dots, N\} \quad (4.16)$$

$$y_i = c_i + a_i \quad y_i^f = c_i^f + a_i^f \quad \forall i \quad (4.17)$$

$$\sum_i l_i a_i = C(x) \quad \sum_i l_i^f a_i^f = C^f(x^f) \quad \forall i \quad (4.18)$$

$$x + x^f \geq \bar{x} \quad (4.19)$$

a) Allocation intragénérationnelle des coûts

Pour alléger les écritures, le calcul des conditions du premier ordre du problème (4.15)-(4.19) est présenté en annexe 2. Nous en tirons immédiatement la règle d'allocation des coûts au sein des générations présentes et futures. Celle-ci consiste pour chacune des générations à égaliser les utilités marginales de la consommation pondérées par les poids α_i de la manière suivante :

$$\alpha_1 \cdot U_1'(y_1 - a_1) = \dots = \alpha_N \cdot U_N'(y_N - a_N) \quad (4.20)$$

$$\beta_1 \cdot U_1^{f'}(y_1^f - a_1^f) = \dots = \beta_N \cdot U_N^{f'}(y_N^f - a_N^f) \quad (4.21)$$

Soit en remplaçant les poids par leurs expressions :

$$\frac{U_1'(y_1 - a_1)}{U_1'(y_1)} = \dots = \frac{U_N'(y_N - a_N)}{U_N'(y_N)} \quad (4.22)$$

$$\frac{U_1^{f'}(y_1^f - a_1^f)}{U_1^{f'}(y_1^f)} = \dots = \frac{U_N^{f'}(y_N^f - a_N^f)}{U_N^{f'}(y_N^f)} \quad (4.23)$$

Notons tout d'abord que la répartition des coûts qui dérive des expressions (4.22)-(4.23) présente deux caractéristiques très importantes. En premier lieu, la règle d'allocation des coûts est la même pour la période présente et pour la période future. Il s'agit ici d'une simple conséquence du fait que les poids sont choisis de la même manière à la génération présente et à la génération future. Mais cette propriété est très importante pour la négociation. Elle nous indique en effet qu'une même clé de répartition des efforts peut légitimement être employée aujourd'hui comme demain, ce qui simplifie la discussion, en particulier sur les engagements futurs des différentes Parties. Nous aurons l'occasion d'y revenir au chapitre 8.

En second lieu, la règle d'allocation des coûts entre les pays se révèle indépendante de l'allocation des efforts entre les générations (les grandeurs x et x^f n'apparaissant pas dans les expressions 4.22 et 4.23). L'allocation intragénérationnelle peut donc être séparée de l'allocation intergénérationnelle. En outre, cette distribution au sein d'une génération ne dépend pas non plus de la distribution géographique des dommages, qui sont « socialisés » par la donnée d'une cible globale $\bar{x}$. Il s'avère ainsi économiquement justifié, au moins dans le cadre particulier de la « solidarité universelle », de rechercher des principes distributifs entre individus d'une même génération indépendamment du montant global des efforts ou de leur partage temporel.

Pour expliciter le principe de distribution sous-jacent aux expressions (4.22) et (4.23), commençons par prendre l'exemple d'une fonction d'utilité logarithmique. Dans ce cas, la règle (4.22) se simplifie en (4.24) ou encore en (4.25) :

$$\frac{y_1}{y_1 - a_1} = \dots = \frac{y_N}{y_N - a_N} \quad (4.24)$$

$$\Rightarrow \frac{a_i}{a_j} = \frac{y_i}{y_j} \quad \forall i, j \quad (4.25)$$

Dans ce cas particulier, la règle optimale consiste ainsi à allouer les coûts de réduction des émissions proportionnellement aux revenus par tête. Plus généralement, si l'utilité marginale de la consommation décroît plus vite que le revenu, alors le rapport des coûts d'abattement sera plus défavorable aux pays les plus riches (par exemple pour des fonctions d'utilité de la forme $u(c) = -c^{-\nu}$ avec $\nu > 1$). Dans le cas contraire, les pays les plus pauvres seront proportionnellement plus sollicités.

L'introduction de poids α_i et β_i calibrés pour éviter des transferts de richesse aboutit donc à une solution dans laquelle toutes les régions cotisent¹², mais de manière très différenciée. Le tableau 4.1 ci-dessous présente en effet la répartition mondiale d'une dépense annuelle de 10 milliards de dollars (1997) au prorata du PIB par tête. Nous constatons que tant les contributions individuelles (colonne 3) que les contributions nationales totales (colonne 4) sont fortement différenciées entre les pays. Chaque

¹² Ce qui vérifie *a posteriori* le fait que les niveaux de réduction des émissions a_i et a_i^f sont bien strictement positifs.

Américain paie ainsi 10,3\$ pour le climat contre seulement 15 cents pour chaque Indien (un ratio de 71 pour 1), chaque Européen paie 7,6\$ (52 pour 1), et chaque Chinois seulement 26 cents (1,8 pour 1). Globalement les pays de l'OCDE contribuent pour près des quatre cinquièmes de l'effort total.

	PIB/tête (\$/tête)	Population (Millions)	Contribution par tête (\$/tête)	Contribution totale (M\$)	Part du total	Ratio des contributions par tête /Inde
OCDE	22538	990,9	7,92	7851	78,51%	54,6
Non-OCDE	1266	4826,6	0,45	2149	21,49%	3,1
USA	29364	267,7	10,32	2763	27,63%	71,1
EU-15	21726	369,8	7,64	2824	28,24%	52,6
France	23794	58,6	8,36	490	4,90%	57,6
Chine	746	1227,6	0,26	322	3,22%	1,8
Inde	413	961,2	0,15	140	1,40%	1,0
Brésil	4919	163,5	1,73	283	2,83%	11,9
Afrique	674	741,1	0,24	176	1,76%	1,6
Ethiopie	95	60,1	0,03	2	0,02%	0,2

Tableau 4.1 Répartition d'un effort global de 10 milliards de dollars au prorata du PIB par tête 1997 (règle 4.25). La troisième colonne indique la contribution par habitant, alors que la quatrième donne la contribution totale du pays considéré (colonne 2 x colonne 3), la cinquième colonne indique la part du pays dans le financement total de l'effort climatique, et la sixième les contributions par tête nationales rapportées à celle de l'Inde (Source : Enerdata, en dollars 1997).

Même si les contributions sont calculées sur la base des PIB exprimés en parité de pouvoir d'achat, les différences entre pays restent très importantes, comme le montre le tableau 4.2. Dans ce nouveau contexte, chaque Américain paie 8,2\$ (17 fois plus que chaque Indien) et chaque Européen 5,7\$ (ratio de 12 contre 1). L'OCDE contribue cette fois-ci à hauteur des trois cinquièmes de l'effort global.

	PIB en PPP/tête (\$/tête)	Population (Millions)	contribution par tête (\$/tête)	Contribution totale (M\$)	Part du total	Ratio des contributions par tête /Inde
OCDE	21141	990,9	6,00	5946	59,46%	12,6
ROW	2960	4826,6	0,84	4054	40,54%	1,8
USA	29364	267,7	8,23	2204	27,63%	17,3
EU-15	20224	369,8	5,74	2123	21,23%	12,1
France	23794	58,6	6,25	366	4,90%	13,2
Chine	746	1227,6	0,89	1089	3,22%	1,9
Inde	413	961,2	0,48	457	1,40%	1,0
Brésil	4919	163,5	1,84	301	2,83%	3,9
Afrique	1847	741,1	0,52	389	3,89%	1,1
Ethiopie	95	60,1	0,14	9	0,02%	0,3

Tableau 4.2 Répartition d'un effort global de 10 milliards de dollars au prorata du PIB par tête 1997 mesuré en parités de pouvoir d'achat (règle 4.25). La troisième colonne indique la contribution par habitant, alors que la quatrième donne la contribution totale du pays considéré (colonne 2 x colonne 3), la cinquième colonne indique la part du pays dans le financement total de l'effort climatique, et la sixième les contributions par tête nationales rapportées à celle de l'Inde (Source : Enerdata, en dollars 1997).

Remarquons ici qu'un partage de la charge fondé sur une distribution des poids dans la fonction d'utilité au prorata du PIB par tête se révèle finalement une bonne traduction du principe de « responsabilité commune mais différenciée » invoqué par la Convention Cadre des Nations Unies sur le Changement Climatique (ONU, 1992). Si nous avions au contraire opté pour un choix de poids plus « équitable », par exemple en affectant à chaque individu un poids égal dans la fonction d'utilité

sociale, nous aurions obtenu une distribution des coûts dans laquelle la région la plus riche financerait l'intégralité du bien public, ce qui n'apparaît pas forcément comme plus « juste ».

Sans prendre ici parti pour l'une ou pour l'autre de ces solutions, il convient de souligner ici le décalage entre la perception *a priori* que nous pouvons avoir de la distribution des poids dans la fonction d'utilité sociale, et le jugement *a posteriori* que nous pouvons porter sur le caractère plus ou moins équitable de la distribution des contributions à la lutte contre l'effet de serre à laquelle nous parvenons finalement. Ce décalage illustre aussi tout l'intérêt du parti pris méthodologique que nous avons adopté en introduction, à savoir aller au bout des conséquences des différents principes de nature éthique qui sont proposés pour coordonner l'action, dès lors que ceux-ci ne s'imposent pas de manière évidente à tous.

b) Allocation des coûts entre génération présente et génération future

Le rapport des coûts marginaux de réduction des émissions entre les deux périodes est donné à l'équilibre par le rapport suivant :

$$\frac{C'(x)}{C^f(x^f)} = \frac{\mu}{\lambda} = \varphi^n \frac{\beta_i}{\alpha_i} \frac{\frac{dU_i}{dc^f}}{\frac{dU_i}{dc}} = \varphi^n \frac{\frac{dU_i}{dc}(y_i)}{\frac{dU_i^f}{dc^f}(y_i^f - a_i^f)} \quad \forall i \quad (4.26)$$

Le rapport des coûts marginaux de réduction des émissions présentes sur les coûts marginaux de réduction des émissions futures est donc égal au produit du facteur d'actualisation par le rapport des taux marginaux de substitution entre consommation future et consommation présente avant et après abattement.

Si les coûts d'abattement restent faibles (au sens mathématique du terme) devant le revenu par tête total à chaque période, le taux marginal de substitution entre consommations présentes et futures reste pratiquement inchangé par la mise en place des politiques climatiques. Le rapport des coûts marginaux de réduction des émissions se réduit alors au facteur d'actualisation, soit :

$$\frac{C'(x)}{C^f(x^f)} \approx \varphi^n \quad (4.27)$$

Avant de commenter cette relation, il est important d'en préciser le domaine de validité. (4.27) est en effet l'approximation au premier ordre de (4.26). Cette approximation est valable si les coûts d'abattement a_i et a_i^f restent « petits » devant y_i et y_i^f . Mais comme nous l'avons déjà indiqué au chapitre 3, « petitesse » au sens mathématique et « petitesse » au sens économique ne sont pas synonymes : en effet, si les coûts sont de 1% du PIB de chaque région à la période présente et de 5% du PIB de chaque région à la seconde, le ratio des coûts marginaux d'abattement calculé avec (4.27) n'est éloigné que de 5% de celui qui serait calculé avec la formule exacte (4.26). De fait, l'équation (4.27) constitue une bonne approximation de (4.26) alors même que les coûts d'abattement sont économiquement très élevés.

Pour donner un point de comparaison, rappelons ici que la perte de produit mondial brut entraînée par la seconde guerre mondiale n'est « que » de 5%. Plus modestement, mais plus près de nous, les dommages des tempêtes de décembre 1999 sur le réseau électrique devraient coûter environ 15 milliards de francs à EDF, ce qui n'est finalement qu'un tiers de l'investissement annuel moyen de l'entreprise. Il faut donc bien se garder d'assimiler la notion de petitesse mathématique, qui permet d'identifier une fonction à son développement limité au premier ordre, de la notion de petitesse économique.

Cette relation (4.27) présente deux caractéristiques très importantes :

- En premier lieu, le rapport des coûts marginaux de réduction des émissions entre les deux périodes dépend de deux paramètres principaux : le taux d'actualisation global et l'évolution des coûts d'abattement dans le temps, qui dépend elle-même des hypothèses formulées sur le progrès technique, l'inertie et la pénétration des technologies moins émettrices sur les marchés.
- En second lieu, l'allocation temporelle des coûts ne dépend pas de la distribution spatiale des efforts de réduction des émissions. Nous obtenons ainsi un premier résultat sur la séparation entre allocations spatiales et temporelles des coûts : en univers « solidarité dynastique » et en coûts efficacité, les distributions spatiales et temporelles des coûts de réduction des émissions de gaz à effet de serre sont totalement indépendantes.

1.2.3. « Solidarité universelle » dans un cadre coûts bénéfiques

Passons maintenant à une analyse coûts bénéfiques. Le niveau total d'abattement $x+x^f$ devient maintenant une variable de commande du modèle, et le programme de maximisation du planificateur s'écrit :

$$\text{Max}_{a_i, a_i^f, x, x^f} \quad W = \sum_i l_i \cdot \alpha_i \cdot U_i(c_i) + \phi^n \cdot \sum_i l_i^f \cdot \beta_i \cdot U_i^f(c_i^f - d_i(x+x^f)) \quad (4.28)$$

$$\text{s.c. } a_i \geq 0 \quad a_i^f \geq 0 \quad \forall i \in \{1, \dots, N\} \quad (4.29)$$

$$y_i = c_i + a_i \quad y_i^f = c_i^f + a_i^f \quad \forall i \quad (4.30)$$

$$\sum_i l_i \cdot a_i = C(x) \quad \sum_i l_i^f \cdot a_i^f = C^f(x^f) \quad \forall i \quad (4.31)$$

a) Distribution intergénérationnelle des coûts et objectif environnemental de la politique climatique

La résolution du système (4.28)-(4.31), détaillée en annexe 2, nous donne les coûts marginaux de réduction des émissions à l'équilibre à chacune des périodes (où le signe moins compense le fait que dans nos notations, la fonction de dommages est décroissante avec la qualité de l'environnement x) :

$$C'(x) = -\phi^n \cdot \sum_i l_i^f \cdot \frac{\beta_i}{\alpha_i} \cdot \frac{\frac{dU_i^f}{dc}(y_i^f - a_i^f - d_i(x+x^f))}{\frac{dU_i}{dc}(y_i - a_i)} \cdot d_i'(x+x^f) \quad (4.32)$$

$$C_f'(x_f) = -\sum_i l_i^f \cdot d_i'(x+x^f) \quad (4.33)$$

La condition (4.33) traduit le fait qu'étant donnée la décision de la génération présente, la génération future doit réduire ses émissions de telle sorte que ses coûts marginaux d'abattement soient égaux aux dommages marginaux futurs.

La condition (4.32) indique quant à elle que les coûts marginaux de réduction des émissions à la période présente doivent être à l'équilibre égaux à la somme des disponibilités marginales à épargner pondérées par les dommages marginaux futurs.

Nous retrouvons ici une condition analogue à celle de Bowen, Lindhal et Samuelson. Dans le cas d'un bien public produit et consommé simultanément par les agents, cette condition indique en effet que

pour maximiser le bien-être social, le bien public doit être produit en quantité telle que le coût marginal de sa production soit égal à la somme des disponibilités à payer pour ce bien de l'ensemble des agents qui le consomment.

Toutefois, puisque nous raisonnons maintenant de manière intertemporelle, la disponibilité à payer pour l'environnement est représentée ici par une disponibilité à épargner pour limiter les dommages futurs du changement climatique (pondérée par les dommages marginaux d'abattement), et non plus par un taux de substitution entre consommation du bien public et consommation du bien privé comme dans la condition BLS.

Ce changement nous autorise à pousser l'analyse un cran plus loin. Supposons que les dommages comme les coûts de réduction des émissions restent à l'équilibre « petits » devant les revenus initiaux (au sens mathématique du terme) à la période présente et à la période future, ce qui est vérifié pour des dommages allant jusqu'à 5-10% des revenus futurs (voir section 1.2.2.1.2.2.b). Dans ce cas, le taux marginal de substitution entre consommation présente et consommation future après la donnée des abattements et des dommages est pratiquement égal au taux marginal de substitution entre consommation présente et consommation future avant abattement. La relation (4.32) se simplifie en :

$$C'(x) \approx \varphi^n \cdot C'_f(x_f) \approx -\varphi^n \cdot \sum_i l_i^f \cdot d_i'(x+x^f) \quad (4.34)$$

Nous retrouvons ici les deux propriétés que nous avons déjà observées dans le cadre coûts efficacité (équation 4.27). La distribution temporelle des coûts d'abattement dépend de l'articulation entre inertie, progrès technique et actualisation. En outre, cette distribution temporelle des coûts d'abattement présents et futurs est indépendante (i) de la manière dont les efforts sont distribués entre les régions et (ii) de la manière dont les dommages sont distribués entre régions : seul intervient en effet dans (4.34) le dommage marginal total agrégé sur le monde entier.

Par contre, et contrairement au cadre coûts efficacité, la formule (4.34) n'est plus valable dans tous les cas. En effet, même si les dommages totaux restent faibles, certains pays pourraient être frappés de manière très importantes par le changement climatique. Le lecteur peut penser par exemple aux Iles du Pacifique menacées de disparition ou aux risques de désertification accrus dans certains pays d'Afrique subsaharienne. La disponibilité à épargner de ces régions est alors nettement plus importante avec, que sans, changement climatique. Par conséquent, leurs dommages marginaux sont pondérés dans (4.32) par un coefficient nettement plus grand que 1 : l'effort mondial de première période est alors plus élevé.

b) Distribution des coûts d'abattement au sein d'une même génération

Comme dans le cas coûts efficacité, la règle d'allocation des coûts d'abattement au sein d'une même génération consiste à égaliser les utilités marginales de la consommation après abattement pondérées par les poids α_i et β_i , soit :

$$\frac{\frac{dU_1}{dc}(y_1 - a_1)}{\frac{dU_1}{dc}(y_1)} = \dots = \frac{\frac{dU_N}{dc}(y_N - a_N)}{\frac{dU_N}{dc}(y_N)} \quad (4.35)$$

$$\frac{\frac{dU_1^f}{dc^f}(y_1^f - a_1^f - d_1(x+x^f))}{\frac{dU_1^f}{dc^f}(y_1^f)} = \dots = \frac{\frac{dU_N^f}{dc^f}(y_N^f - a_N^f - d_N(x+x^f))}{\frac{dU_N^f}{dc^f}(y_N^f)} \quad (4.36)$$

La répartition des coûts de réduction des émissions à la première période reste indépendante de la distribution géographique des impacts. Il s'agit là d'une conséquence du fait que la solidarité est « universelle » : la génération présente est donc disposée à payer pour la précaution quelle que soit la nationalité du bénéficiaire futur de cet effort.

Moins intuitif est le fait que la distribution future des coûts d'abattement dépend de la distribution des impacts. Le revenu futur des agents y_i^f est en effet diminué des dommages du changement climatique. Si nous discutons de la répartition des coûts d'abattement à moyen terme (par exemple 2050), nous pouvons encore considérer en première approximation que les effets des dommages du changement climatique resteront encore faibles à cet horizon. A niveau toutefois, l'hypothèse est déjà discutable. Et à plus long terme, il n'est plus possible de séparer la question de la répartition des efforts d'abattement de celle de la distribution des dommages.

1.2.4. Conclusion sur la « solidarité universelle »

En résumé, la distribution des efforts à l'optimum en « solidarité universelle » présente les deux propriétés suivantes :

- La répartition dans le temps des efforts de réduction des émissions est indépendante du niveau optimal d'émissions. Cet énoncé est tautologique dans un raisonnement coûts efficacité, puisque la qualité de l'atmosphère est fixée *ex ante*. Il se révèle aussi vérifié en coûts bénéfices. Par contre, la réciproque de cette propriété n'est pas vraie : en univers coûts bénéfices, le niveau optimal de réduction des émissions dépend de la manière dont les coûts sont répartis dans le temps.
- Que ce soit en coûts efficacité ou coûts bénéfices, la règle de répartition des coûts d'abattement entre régions à chaque génération est indépendante et de la distribution temporelle des coûts, et de la distribution des dommages. Cette propriété n'est démentie que pour les périodes futures pendant lesquelles, en coûts bénéfices, les dommages du changement climatique deviennent significatifs par rapport à la richesse totale de la région considérée.

Nous allons maintenant examiner dans quelle mesure ces propriétés restent vraies en « solidarité dynastique ».

1.3. « Solidarité dynastique » : quand équités inter et intragénérationnelle ne peuvent plus automatiquement être séparées

1.3.1. Poids des utilités des agents dans la fonction de bien-être social

Dans un cadre de solidarité « dynastique », la fonction de bien-être social W du planificateur est donnée par :

$$W = \sum_i \alpha_i \cdot l_i \cdot W_i(c_i, c_i^f) \quad (4.37)$$

Nous choisissons à nouveau le jeu de poids « de Negishi » tel que le planificateur considère comme « optimale » la distribution présente des revenus, c'est-à-dire que même s'il pouvait réaliser des transferts forfaitaires entre régions, il ne le ferait pas. Nous obtenons ainsi :

$$\alpha_i = \frac{1}{\frac{\partial W_i}{\partial c_i}(y_i, y_i^f)} \quad (4.38)$$

A la différence du cas de la « solidarité universelle », il n'est plus possible au planificateur d'assurer aujourd'hui l'optimalité de la distribution future des revenus y_i^f . En effet, la fonction de bien-être social en « solidarité dynastique » ne comprend maintenant qu'un seul jeu de poids. Pour que ce jeu corresponde aussi à la distribution future des revenus, il faudrait que les taux marginaux de substitution entre consommation future et consommation présente soient égaux (4.39), ce qui reviendrait à une égalisation des taux d'actualisation à la population près (4.40).

$$\frac{l_1^f \frac{\partial W_1}{\partial c^f}(y_1, y_1^f)}{l_1^f \frac{\partial W_1}{\partial c}(y_1, y_1^f)} = \dots = \frac{l_N^f \frac{\partial W_N}{\partial c^f}(y_N, y_N^f)}{l_N^f \frac{\partial W_N}{\partial c}(y_N, y_N^f)} \quad (4.39)$$

$$\Leftrightarrow \frac{l_1^f}{l_1^f} (1+\rho_1)^n = \dots = \frac{l_N^f}{l_N^f} (1+\rho_N)^n \quad (4.40)$$

Or si les taux d'actualisation des différentes régions divergent, ce qui peut par exemple se produire lorsque les taux de croissance régionaux sont différents, alors la condition (4.39) n'est plus vérifiée. Nous devons donc examiner dans la suite deux cas de figure différents :

- Soit les taux marginaux de substitution entre consommation future et consommation présente entre les différentes régions du monde sont égaux, ce qui revient à supposer que les taux d'actualisation sont égaux. Même s'il revient à formuler les hypothèses très fortes sur la convergence à long terme des taux de croissance, et donc sur la diffusion du progrès technique ou la circulation des capitaux, des biens et des personnes, ce cas de figure n'est pas complètement irréaliste à moyen ou long terme.
- Soit les taux marginaux de substitution entre consommation future et consommation présente restent durablement différents entre les différentes régions du monde. Nous nous trouvons alors dans un monde dans lequel les différences d'allocation de ressources, les limites physiques, politiques et culturelles à la circulation des biens, des personnes et des capitaux ou les barrières institutionnelles entraînent une différenciation durable des taux d'actualisation régionaux. Cette description est valable pour le monde actuel et restera vraisemblablement d'actualité à court et moyen terme, le long terme étant plus problématique.

Nous examinons successivement ces deux cas de figure dans en univers coûts efficacité (1.3.2 et 1.3.3). Nous traiterons ensuite le cadre coûts bénéfices (1.3.4).

1.3.2. « Solidarité dynastique » lorsque les taux d'actualisation sont égaux (coûts efficacité)

Dans un cadre coûts efficacité et en « solidarité dynastique », le planificateur doit résoudre le problème suivant :

$$\text{Max}_{a_i, a_i^f} \quad W = \sum_i l_i \alpha_i W_i(c_i, c_i^f) \quad (4.41)$$

$$\text{s.c. } a_i \geq 0 \quad a_i^f \geq 0 \quad \forall i \in \{1, \dots, N\} \quad (4.42)$$

$$y_i = c_i + a_i \quad y_i^f = c_i^f + a_i^f \quad \forall i \quad (4.43)$$

$$\sum_i l_i a_i = C(x) \quad \sum_i l_i^f a_i^f = C^f(x^f) \quad \forall i \quad (4.44)$$

$$x + x^f \geq \bar{x} \quad (4.45)$$

a) Répartition des coûts de réduction des émissions au sein de chaque génération

Dans le problème de maximisation (4.41)-(4.45), la distribution optimale présente des coûts d'abattement consiste à nouveau à égaliser les utilités marginales de la consommation pondérée par les poids α_i (équation 4.46, voir calculs à l'annexe 2). En remplaçant les poids par leurs valeurs, cette équation se réduit finalement à l'expression (4.47).

$$\alpha_1 \cdot \frac{\partial W_1}{\partial c}(y_1 - a_1, y_1^f - a_1^f) = \dots = \alpha_N \cdot \frac{\partial W_N}{\partial c}(y_N - a_N, y_N^f - a_N^f) \quad (4.46)$$

$$\frac{\frac{\partial W_1}{\partial c}(y_1 - a_1, y_1^f - a_1^f)}{\frac{\partial W_1}{\partial c}(y_1, y_1^f)} = \dots = \frac{\frac{\partial W_N}{\partial c}(y_N - a_N, y_N^f - a_N^f)}{\frac{\partial W_N}{\partial c}(y_N, y_N^f)} \quad (4.47)$$

Deux cas de figure sont alors possibles. Si les consommations présentes et futures sont complémentaires, c'est-à-dire si les fonctions d'utilité intertemporelles W_i ne peuvent être représentées au moyen d'une somme pondérée de l'utilité de la consommation présente et de l'utilité de la consommation future, alors la distribution des coûts de réduction des émissions à la première période est dépendante de la distribution des coûts à la seconde. Dans ce cas général, il n'y a donc pas indépendance entre les distributions des coûts de réduction des émissions aux différentes périodes considérées.

Par contre, si toutes les fonctions d'utilité intertemporelles régionales sont séparables en les consommations présentes et futures, alors les niveaux de consommation futurs n'interviennent plus dans la relation (4.47) : nous retrouvons alors la règle d'allocation des coûts de réduction des émissions que nous avons obtenue en « solidarité universelle ». En particulier, si les fonctions d'utilité sont logarithmiques, alors les coûts sont alloués proportionnellement au revenu par tête.

Au sein de la génération future, les efforts d'abattement futurs a_i^f doivent être répartis à l'optimum de telle sorte que les utilités marginales de la consommation future pondérées par les poids α_i soient égalisées (4.48). En remplaçant les poids par leurs valeurs, nous obtenons finalement (4.49).

$$\alpha_1 \cdot \frac{l_1}{l_1^f} \frac{\partial W_1}{\partial c^f}(y_1 - a_1, y_1^f - a_1^f) = \dots = \alpha_N \cdot \frac{l_N}{l_N^f} \frac{\partial W_N}{\partial c^f}(y_N - a_N, y_N^f - a_N^f) \quad (4.48)$$

$$\frac{l_1}{l_1^f} \frac{\frac{\partial W_1}{\partial c^f}(y_1 - a_1, y_1^f - a_1^f)}{\frac{\partial W_1}{\partial c}(y_1, y_1^f)} = \dots = \frac{l_N}{l_N^f} \frac{\frac{\partial W_N}{\partial c^f}(y_N - a_N, y_N^f - a_N^f)}{\frac{\partial W_N}{\partial c}(y_N, y_N^f)} \quad (4.49)$$

L'indépendance entre consommations présentes et consommations futures est à nouveau essentielle. De plus, si les taux d'actualisation régionaux sont égaux, alors nous retrouvons la règle de répartition des coûts futurs que nous avons obtenue en « solidarité universelle » :

$$\frac{\frac{\partial W_1}{\partial c^f}(y_1^f - a_1^f)}{\frac{\partial W_1}{\partial c^f}(y_1^f)} = \dots = \frac{\frac{\partial W_N}{\partial c^f}(y_N^f - a_N^f)}{\frac{\partial W_N}{\partial c^f}(y_N^f)} \quad (4.50)$$

b) Répartition des coûts d'abattement entre générations

Si les consommations présentes et futures de bien composite sont indépendantes, la répartition temporelle des dépenses d'abattement en « solidarité dynastique » est de la forme suivante :

$$\frac{C'(x)}{C^f(x^f)} = \frac{l_i^f \frac{\partial W_i}{\partial c}(y_i - a_i)}{l_i \frac{\partial W_i}{\partial c^f}(y_i^f - a_i^f)} \quad \forall i \quad (4.51)$$

De fait, pour des dépenses d'abattement « faibles » (toujours au sens mathématique du terme) devant le revenu, et des taux d'actualisation identiques dans tous les pays, le rapport des coûts marginaux d'abattement est donné par la relation approchée suivante :

$$\frac{C'(x)}{C^f(x^f)} \approx \frac{l_i^f}{l_i} \cdot \psi^n \quad \forall i \quad (4.52)$$

Dans cette relation, le facteur d'actualisation ψ est le facteur d'actualisation associé au taux d'actualisation ρ (nous pouvons faire disparaître l'indice i puisque nous supposons ici que les taux régionaux sont égaux). Nous retrouvons la règle obtenue en « solidarité universelle ».

En conclusion, si les taux d'actualisation régionaux sont égaux, les règles d'allocation optimale des efforts d'abattement en « solidarité dynastique » sont les mêmes qu'en « solidarité universelle ». Ce résultat n'est cependant vrai qu'à la condition que les consommations présentes et futures soient indépendantes dans toutes les fonctions de bien-être social intertemporelles régionales¹³.

1.3.3. « Solidarité dynastique » si les taux d'actualisation sont différents

a) Impossibilité de faire en sorte que toutes les régions paient à chacune des deux périodes

Plaçons nous maintenant dans le cas où la condition (4.39) n'est plus vérifiée, ce qui signifie que les taux d'actualisation régionaux sont différents. Supposons en outre pour simplifier que chacune des fonctions de bien-être intertemporelles régionales sont séparables en les consommations présentes et futures.

Nous nous trouvons maintenant devant une difficulté concernant la distribution optimale des efforts de réduction des émissions futures. La simplification de la règle de distribution des coûts futurs (4.48) en (4.49) n'est maintenant plus possible. Les coûts futurs sont répartis avec des poids α_i qui ne sont plus égaux à l'inverse de l'utilité marginale des revenus futurs de chaque région :

$$\alpha_1 \cdot \frac{\partial W_1}{\partial c^f}(y_1^f - a_1^f) = \dots = \alpha_N \cdot \frac{\partial W_N}{\partial c^f}(y_N^f - a_N^f) \quad (4.53)$$

Or le théorème de Negishi nous indique que les poids α_i choisis inversement proportionnels aux utilités marginales du revenu futur sont les seuls qui permettent d'assurer « l'optimalité » de la distribution des revenus futurs. Par conséquent, la distribution future des efforts de réduction des émissions (a_i^f) anticipée aujourd'hui a de bonnes chances de ne pas correspondre à la distribution des richesses au sein de la génération future. elle peut donc être rejetée par les générations futures, et le programme d'abattement peut s'avérer dynamiquement incohérent.

¹³ Nous présentons au chapitre 5 un théorème de Tjalling Koopmans (1960) qui démontre que sous certaines hypothèses simples, la fonction d'utilité intertemporelle peut être considérée comme séparable.

Pour illustrer ce risque, donnons-nous un exemple très simple avec un pays riche et un pays pauvre. Leur revenu par tête est respectivement 10 et 1 à la première période, puis de 20 et 4 à la seconde. Le taux de croissance du pays le plus pauvre est donc deux fois plus élevé que celui du pays le plus riche, ce qui est un chiffre tout à fait plausible. Nous supposons par commodité que les populations de chacun des deux pays restent identiques entre les deux périodes, que leurs fonctions d'utilité intertemporelles sont séparables en deux termes logarithmiques, et que leurs « préférences pures pour le présent » sont identiques.

Supposons que la génération future doive effectuer un effort d'abattement total de 0,12. Nous utilisons la condition (4.53) pour en déterminer la répartition entre les deux régions. Si les poids α_i de cette relation sont inversement proportionnels à l'utilité marginale du revenu futur, alors les coûts de réduction des émissions a_1^f et a_2^f vérifient l'équation (4.54) ci-dessous, et nous obtenons des dépenses d'abattement proportionnelles aux revenus futurs.

$$\frac{y_1^f}{y_1^f - a_1^f} = \frac{y_2^f}{y_2^f - a_2^f} \Rightarrow \frac{a_1^f}{a_2^f} = \frac{y_1^f}{y_2^f} \Rightarrow a_1^f = 0,10 \text{ et } a_2^f = 0,02 \quad (4.54)$$

Si maintenant les poids α_i de la relation sont inversement proportionnels à l'utilité marginale du revenu *de la période présente*, alors la règle (4.53) se traduit pas l'équation (4.55) suivante :

$$\frac{y_1}{y_1 - a_1^f} = \frac{y_2}{y_2 - a_2^f} \quad (4.55)$$

Cette équation n'a en général pas de solution. Intuitivement, la raison en est la suivante : si les taux de croissance sont trop différents, alors l'écart entre les rapports $\frac{y_1}{y_1 - a_1^f}$ et $\frac{y_2}{y_2 - a_2^f}$ est très important, et les ponctions sur le revenu futur opérées par les dépenses d'abattement a_1^f et a_2^f ne sont pas suffisantes pour le réduire significativement. La seule manière d'y parvenir serait d'autoriser des dépenses d'abattement négatives pour la région la moins riche, ce qui équivaudrait à réaliser un transfert de richesse entre régions à l'occasion des politiques climatiques. Or nous avons interdit de tels transferts par la condition (4.42). Nous obtenons de fait une solution en coin dans laquelle l'intégralité de la dépense future est payée par le pays dont le taux de croissance est le plus élevé¹⁴. Dans notre exemple, la solution en coin consiste à faire payer intégralement la région la moins riche de la manière suivante :

$$a_1^f = 0,00 \text{ et } a_2^f = 0,12 \quad (4.56)$$

Tout se passe en fait comme si le pays le plus pauvre était pénalisé par sa croissance « excédentaire » par rapport au pays le plus riche, et que son nouveau poids dans la négociation n'était pas pris en compte. De manière symétrique, si le pays le plus pauvre avait eu une croissance inférieure à celle du pays riche, alors nous aurions vite abouti à une solution en coin symétrique dans laquelle le pays riche aurait financé l'intégralité de l'effort d'abattement.

Il est important de noter que lorsque les abattements restent faibles devant les revenus futurs, la distribution optimale des coûts de réduction des émissions futures est très sensible à tout écart de croissance et passe très rapidement à des solutions en coin. Pour donner un ordre de grandeur, notons que si les coûts de réduction des émissions totaux représentent 5% du revenu futur total, tout écart de plus de 5% entre le rapport des revenus à la date présente et le rapport des revenus à la date future entraîne une solution en coin dans laquelle le pays dont le taux de croissance a été le plus élevé paie la totalité des coûts de réduction des émissions.

¹⁴ Formellement, l'un au moins des multiplicateurs de Lagrange associé aux conditions inégalités (4.42) cesse d'être nul.

b) Etude générale en fonction des poids initiaux

En outre, ce résultat ne dépend pas du fait que nous ayons choisi la distribution des revenus de la première période présente pour calibrer les poids α_i . Pour le vérifier, examinons comment notre exemple se comporte en fonction des poids initiaux, que nous prendrons égaux à α pour le pays 1 et à $1-\alpha$ pour le pays 2. Nous supposons pour alléger les notations qu'il faut répartir une dépense totale $\bar{a}$ à la première période et $\bar{a}^f$ à la seconde. Les distributions des dépenses entre les deux pays sont alors données par les équations suivantes :

$$\frac{\alpha}{y_1 - a_1} = \frac{1-\alpha}{y_2 - a_2} \quad \text{période présente} \quad (4.57)$$

$$\frac{\alpha}{y_1^f - a_1^f} = \frac{1-\alpha}{y_2^f - a_2^f} \quad \text{période future} \quad (4.58)$$

Quelles sont les solutions de la première équation ? Remarquons tout d'abord que si α est très petit (à la limite nul), toute la dépense $\bar{a}$ est supportée par le pays numéro 1, puisque son utilité ne compte presque plus. En revanche, si α est proche de 1, toute la dépense est supportée par le pays 2. L'intervalle $[\alpha_-, \alpha_+]$ dans lequel les deux pays contribuent à la fois à la dépense est caractérisé par les équations suivantes :

$$\frac{\alpha_-}{1-\alpha_-} = \frac{y_1 - \bar{a}}{y_2} \quad \text{et} \quad \frac{\alpha_+}{1-\alpha_+} = \frac{y_1}{y_2 - \bar{a}} \quad (4.59)$$

Numériquement, si $\bar{a}$ représente 1% des revenus totaux de première période et avec les chiffres que nous avons adoptés plus haut, l'intervalle $[\alpha_-, \alpha_+]$ est donné par $[0,908 ; 0,956]$. Nous obtenons de même un intervalle $[\alpha_-^f, \alpha_+^f]$ qui est numériquement de $[0,709 ; 0,726]$. Ces deux intervalles étant disjoints, il existe de toute manière une période pendant laquelle les coûts seront intégralement supportés par l'un ou l'autre des deux pays. La figure 4.1 ci-dessous illustre ce résultat.

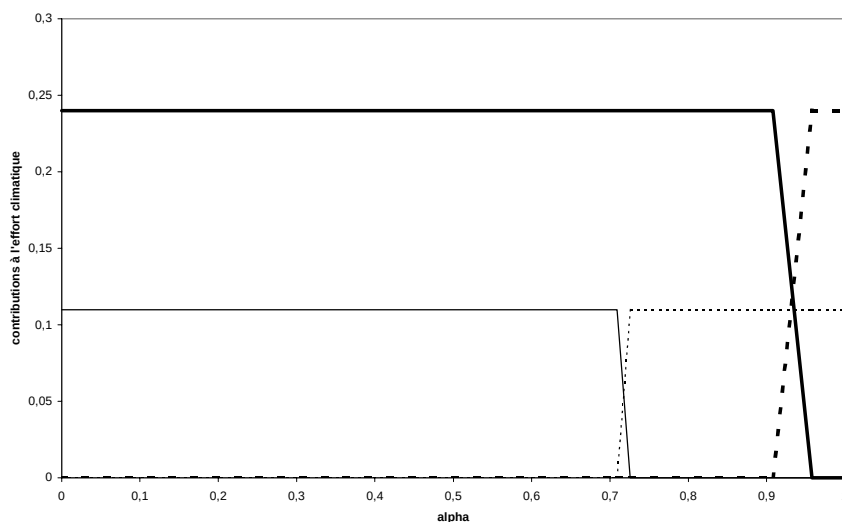


Figure 4.1 : Distribution des coûts présents et futurs en fonction de la pondération α (en abscisse). Les courbes pleines correspondent aux dépenses du pays 1 (le plus riche) et les courbes pointillées aux dépenses du pays 2 (le plus pauvre). Les traits fins correspondent aux dépenses de première période, alors que les traits gras correspondent aux dépenses de seconde période. Les coûts totaux représentent 1% du revenu total présent comme futur ($y_1 = 10, y_2 = 1, y_1^f = 20, y_2^f = 4$).

Pour que les deux intervalles $[\alpha_-, \alpha_+]$ et $[\alpha_-^f, \alpha_+^f]$ se recoupent partiellement, il faudrait que la contribution totale future $\bar{a}^f$ représente au moins 50% des revenus futurs du pays pauvre, soit plus de

8,5% des revenus totaux des deux pays à cette période. En dehors de configurations extrêmes menant à des coûts très élevés, il n'est ainsi pas possible de trouver un jeu de poids tel que, durant les deux périodes, les coûts soient supportés par les deux pays à la fois.

c) Discussion

Revenons maintenant au cas coûts efficacité le plus général. Une contrainte de qualité de l'atmosphère est donnée de manière exogène sous la forme d'un niveau de réduction d'émissions global minimal ($x+x^f \geq \bar{x}$). Les coûts d'abattement mondiaux présents (C) et futurs (C^f) étant donnés, la contrainte carbone définit finalement un taux de substitution entre consommation présente et consommation future que nous notons ε . ε est un taux de substitution entre consommation présente et consommation future en ce sens qu'il est indifférent pour la satisfaction de la contrainte carbone qu'une fraction ε des dépenses d'abattement aujourd'hui soit remplacée par ε de dépenses demain.

Or le fait que la région i possède le taux d'actualisation ρ_i revient à dire qu'il lui est indifférent (à la marge) de réduire d'une quantité Δc sa consommation aujourd'hui dès lors qu'elle récupère $\Delta c \cdot (1+\rho_i)^n$ de consommation supplémentaire à la seconde période. Tout dépend donc de la comparaison entre la valeur de ε et les valeurs des différents taux d'actualisation ρ_i . Les pays pour lesquels ε est plus faible que leur propre taux d'actualisation auront intérêt à transférer le plus possible de contribution carbone plus tard afin de préserver leurs ressources présentes pour leur propre croissance. A l'inverse, les pays pour lesquels ε est plus grand que ρ_i auront intérêt à payer le plus vite possible pour ne pas trop sacrifier de consommation future.

Nous obtenons ainsi une carte du monde dans laquelle, en supposant les mêmes fonctions d'utilité et les mêmes « taux de préférence pure pour le présent », les pays dont le taux de croissance est le plus faible paient aujourd'hui alors que ceux dont le taux de croissance est le plus élevé, et donc pour lesquels la contrainte carbone est plus chère que le développement, ont tendance à payer plus tard.

On pourra objecter que le comportement « bang-bang » du modèle provient du fait que le financement des réductions des émissions et les abattements effectifs sont totalement déconnectés dans notre modèle. Dans une économie réelle, le fait qu'un Etat détienne le monopole sur les technologies de réduction des émissions n'est pas à la portée de toutes les régions, et ne constitue pas automatiquement une situation acceptable par les autres. Cette critique renvoie cependant aux bénéfices potentiels liés au développement de technologies propres, et dépasse largement le cadre de ce travail.

L'analyse du comportement de notre modèle simplifié permet néanmoins de faire deux remarques. Il fournit en premier lieu un argument économique étranger à toute notion de responsabilité historique pour justifier le fait que dans la Convention Climat et en particulier à Kyoto les pays développés aient pris des engagements les plus importants que les pays en voie de développement.

En second lieu, la différence entre la « solidarité universelle » et la « solidarité dynastique » tient ainsi à la manière dont les générations futures « négocient » leurs contributions. Dans le premier cas, il existe en fait deux négociations : l'une réelle au sein de la génération présente et l'autre, virtuelle, au sein de la génération future que le planificateur simule. Mais dans chacune des deux le planificateur tient compte de la distribution des revenus. Dans le second par contre, les générations futures n'existent qu'en tant qu'elles sont représentées par les différents pays. Cette configuration conduit naturellement les pays dont le taux de croissance est le plus élevé à repousser le plus loin possible leurs efforts, nonobstant le fait que les générations futures qui auront à payer ne l'entendront peut être pas de cette manière.

1.3.4. « Solidarité dynastique » en coûts avantages

Toute la discussion qui précède a été menée dans un cadre coûts efficacité. Nous vérifions maintenant que sa philosophie n'est pas modifiée lorsque nous nous plaçons en univers coûts avantages. Le programme du planificateur est alors le suivant :

$$\text{Max}_{a_i, a_i^f, x, x^f} \quad W = \sum_i l_i \cdot \alpha_i \cdot W_i(c_i, c_i^f - d_i(x + x^f)) \quad (4.60)$$

$$\text{s.c. } a_i \geq 0 \quad a_i^f \geq 0 \quad \forall i \in \{1, \dots, N\} \quad (4.61)$$

$$y_i = c_i + a_i \quad y_i^f = c_i^f + a_i^f \quad \forall i \quad (4.62)$$

$$\sum_i l_i \cdot a_i = C(x) \quad \sum_i l_i^f \cdot a_i^f = C^f(x^f) \quad \forall i \quad (4.63)$$

En supposant l'indépendance des consommations aux deux périodes, les conditions du premier ordre s'écrivent alors :

$$\alpha_1 \cdot \frac{\partial W_1}{\partial c}(y_1 - a_1) = \dots = \alpha_N \cdot \frac{\partial W_N}{\partial c}(y_N - a_N) \quad (4.64)$$

$$\alpha_1 \cdot \frac{l_1}{l_1^f} \cdot \frac{\partial W_1}{\partial c^f}(y_1^f - a_1^f - d_1(x + x^f)) = \dots = \alpha_N \cdot \frac{l_N}{l_N^f} \cdot \frac{\partial W_N}{\partial c^f}(y_N^f - a_N^f - d_N(x + x^f)) \quad (4.65)$$

$$C'(x) = - \sum_i l_i \cdot \frac{\frac{\partial W_i}{\partial c^f}(y_i^f - a_i^f - d_i(x + x^f))}{\frac{\partial W_i}{\partial c}(y_i - a_i)} \cdot d_i'(x + x^f) \quad (4.66)$$

$$C_f'(x_f) = - \sum_i l_i^f \cdot d_i'(x + x^f) \quad (4.67)$$

Si les taux d'actualisation sont égaux pour toutes les régions, nous retrouvons les résultats obtenus en « solidarité universelle ». Si les taux d'actualisation sont différents, l'une des égalités (4.64) ou (4.65) n'est plus vérifiée. Nous retrouvons alors une distribution des coûts de réduction des émissions très contrastée. En outre, le niveau optimal de réduction des émissions dépend alors de la richesse et des dommages de la région dont le taux de croissance est le plus élevé. Le comportement général du modèle est identique à celui que nous avons obtenu en coûts efficacité.

En résumé, cette première section nous a permis de montrer que dans un cadre de « solidarité universelle » ou de « solidarité dynastique » avec des taux d'actualisation régionaux égaux, la distribution des coûts d'abattement au sein de la génération présente ne dépendait ni de la distribution future de ces coûts, ni de la cible environnementale retenue (en coûts efficacité), ni du niveau optimal de qualité de l'atmosphère (en coûts bénéfices). La distribution des coûts d'abattement futurs présente les mêmes propriétés, sauf dans le cas (coûts bénéfices) ou les dommages deviennent importants par rapport à la richesse totale d'au moins une des régions du monde. Lorsqu'en « solidarité dynastique » où les taux d'actualisation ne sont pas égaux, les propriétés précédentes restent vraies, mais s'appliquent par contre à une distribution optimale des coûts futurs particulièrement contrastée : le pays dont le taux de croissance a été le plus élevé finance en effet l'ensemble de l'effort mondial de réduction des émissions.

2. Incertitudes et règles de distribution des coûts et des bénéfices des politiques de réduction des émissions

Toute la question est maintenant de savoir dans quelle mesure l'introduction de l'incertitude modifie ces résultats. Le rapide résumé que nous venons d'en faire suggère que trois sources d'incertitudes peuvent avoir un impact sur les interdépendances entre règles distributives :

- l'incertitude sur les dommages (ou l'incertitude sur le niveau de la contrainte climatique en coûts efficacité) qui peut modifier sensiblement les coûts de première période vers un comportement de « précaution » (cf. chapitre 3) ;
- l'incertitude sur les taux de croissance, dont les conséquences en termes de distribution inter et intra temporelle des coûts d'abattement peuvent être très importantes ;
- enfin l'incertitude sur le progrès technique en matière climatique, et plus généralement sur l'évolution future de la fonction de coûts de réduction des émissions.

Nous examinerons dans la suite l'impact de chacune de ces trois sources d'incertitude sur la distribution des coûts et des bénéfices du changement climatique. Nous ne présenterons ici que les cas les plus représentatifs et laisserons au lecteur le soin de vérifier leur généralité.

2.1. Notations

Nous reprenons le schéma développé au chapitre 3, dans lequel l'information sur l'état réel des dommages (respectivement des taux de croissance ou des coûts d'abattement) n'est donnée qu'au début de la seconde période. Le planificateur prend donc sa décision au début de la première période en maximisant l'espérance de l'utilité de la consommation compte tenu de la connaissance imparfaite dont il dispose sur l'état du monde futur. Nous supposons que le planificateur connaît la liste des états du monde futur possibles et qu'il leur attribue une probabilité subjective d'occurrence.

Posons formellement le problème dans le cas d'une incertitude sur le niveau des dommages. Au début de la première période, M distributions régionales des dommages futurs sont possibles. Ces distributions sont données par les fonctions d_{ij} ($j \in \{1, 2, \dots, M\}$). Le planificateur leur attribue une probabilité subjective d'occurrence notée p_j . Si nous notons a_i les niveaux d'abattement présents et a_{ij}^f les niveaux d'abattement futurs contingents aux M états du monde possibles, le programme de maximisation du planificateur se pose alors (en « solidarité universelle » et en coûts avantages) :

$$\text{Max}_{a_i, a_{ij}^f, x_i, x_j^f} \quad W = \sum_i l_i \cdot \alpha_i \cdot U_i(c_i) + \sum_j p_j \cdot \Phi^n \cdot \sum_i l_i^f \cdot \beta_i \cdot U_i^f(c_{ij}^f - d_{ij}(x_i + x_j^f)) \quad (4.68)$$

$$\text{s.c.} \quad a_i \geq 0 \quad a_{ij}^f \geq 0 \quad \forall i, j \quad (4.69)$$

$$y_i = c_i + a_i \quad y_i^f = c_{ij}^f + a_{ij}^f \quad \forall i, j \quad (4.70)$$

$$\sum_i l_i \cdot a_i = C(x) \quad \sum_i l_i^f \cdot a_{ij}^f = C^f(x_j^f) \quad \forall i, j \quad (4.71)$$

Si l'incertitude porte sur le niveau minimal de qualité de l'environnement (coûts efficacité), les états du monde futurs seraient caractérisés par M niveaux minimums d'abattement $\bar{x}_j$. Dans ce cas de figure, comme dans celui que nous venons de décrire, les paramètres a_i , c_i^f et x_j^f deviennent contingents aux états du monde futur.

Si l'incertitude porte sur le taux de croissance, les états du monde futur sont caractérisés par M distributions possibles des revenus futurs notées y_{ij}^f . Dans ce cas de figure, les paramètres a_i^f , c_i^f sont toujours contingents à l'état du monde futur, tout comme les poids β_i et le facteur d'actualisation ϕ . Le paramètre x^f n'est quant à lui dépendant de l'état du monde futur qu'en univers coûts avantages. En coûts efficacité, la cible environnementale donnée *ex ante* doit être atteinte indépendamment des revenus futurs des différents pays.

Enfin, si l'incertitude porte sur les coûts de réduction des émissions les états du monde futurs sont caractérisés par M fonctions de coûts de réduction des émissions notées C_j^f . Les paramètres a_i^f , c_i^f et x^f deviennent à nouveau contingents aux états du monde futur (en coûts avantages uniquement pour le dernier).

Notons enfin que l'incertitude peut porter sur plusieurs de ces paramètres à la fois. Les états du monde futur sont alors définis comme des combinaisons d'une fonction de dommages (ou de niveaux minimums d'abattement), d'une distribution des revenus futurs et d'une fonction de coûts. D'un point de vue formel, les notations sont identiques, mais plus de paramètres sont maintenant dépendants des états du monde futur.

2.2. Malgré les incertitudes, les règles d'allocation intratemporelles des coûts d'abattement à l'intérieur de chaque génération restent inchangées

2.2.1. Répartition des coûts à la période présente

Le résultat central de notre analyse est que la distribution présente des coûts de réduction des émissions à l'équilibre reste inchangée par rapport à ce qu'elle était en univers certain. La règle d'allocation des coûts de réduction des émissions à la première période consiste toujours à égaliser les ratios entre utilité marginale de la consommation présente après et avant abattement, soit :

$$\frac{\frac{dU_1}{dc}(y_1 - a_1)}{\frac{dU_1}{dc}(y_1)} = \dots = \frac{\frac{dU_N}{dc}(y_N - a_N)}{\frac{dU_N}{dc}(y_N)} \quad (4.72)$$

En particulier, si la fonction d'utilité est logarithmique, les coûts de réduction des émissions à la première période doivent être à l'optimum distribués proportionnellement au revenu par tête de chacune des régions considérées.

La seule exception à cette règle se présente à nouveau dans le cadre de la « solidarité dynastique », si les consommations présentes et futures ne sont pas indépendantes mais complémentaires. Dans ce cas en effet, deux problèmes se posent :

- D'une part, la distribution présente dépend de la distribution des coûts et des dommages futurs dans chacun des états du monde possibles, ce qui donne une relation nettement plus complexe de la forme :

$$\sum_j p_j \alpha_i \cdot \frac{\partial W_1}{\partial c}(y_1 - d_{1i}, y_1^f - d_{1j}^f - d_{1j}(x + x_j^f)) = \dots = \sum_j p_j \alpha_N \cdot \frac{\partial W_N}{\partial c}(y_N - d_{Nj}, y_N^f - d_{Nj}^f - d_{Nj}(x + x_j^f)) \quad (4.73)$$

- D'autre part, si l'incertitude porte sur les revenus initiaux futurs, il n'est alors même plus possible de construire les poids α_i en utilisant le théorème de Negishi¹⁵.

¹⁵ Il n'est en effet plus possible de faire l'hypothèse, comme nous l'avons fait dans le cas certain, qu'un marché parfait s'établissait entre les acteurs à la date présente à revenu futur donné. Nous conjecturons que les poids α_i

2.2.2. Répartition des coûts à la période future

La distribution des coûts de réduction des émissions entre régions à la seconde période devient en situation d'incertitudes contingente à l'état du monde effectivement réalisé. Cependant, les conclusions ne changent pas non plus par rapport au cas certain. En effet, dans chacun des états du monde possibles, la distribution optimale des coûts futurs est telle que les rapports entre utilités marginales du revenu futur après et avant abattement soient égaux. Cette règle générale se traduit cependant de deux manières différentes selon que nous nous trouvons dans un cadre coûts efficacité ou coûts bénéfices :

- Dans le premier cas en effet, la règle énoncée au-dessus aboutit finalement à l'équation (4.74)¹⁶ : la distribution des dommages n'intervient pas dans le raisonnement, et si les utilités marginales du revenus sont logarithmiques, alors les coûts d'abattement futurs sont proportionnels aux revenus initiaux futurs.

$$\frac{\frac{dU_1^f}{dc^f(y_1^f - a_1^f)}}{\frac{dU_1^f}{dc^f(y_1^f)}} = \dots = \frac{\frac{dU_N^f}{dc^f(y_N^f - a_N^f)}}{\frac{dU_N^f}{dc^f(y_N^f)}} \quad (4.74)$$

- Dans le second cas en revanche, la règle (4.75) s'applique. Nous retrouvons le fait que si les dommages sont élevés, alors la règle de distribution des coûts d'abattement future dépend de la distribution des dommages.

$$\frac{\frac{dU_1^f}{dc^f(y_1^f - a_1^f - d_1(x + x^f))}}{\frac{dU_1^f}{dc^f(y_1^f)}} = \dots = \frac{\frac{dU_N^f}{dc^f(y_N^f - a_N^f - d_N(x + x^f))}}{\frac{dU_N^f}{dc^f(y_N^f)}} \quad (4.75)$$

Ces résultats ne sont bien entendu plus valables lorsque les consommations présentes et futures sont complémentaires en « solidarité dynastique ». Toujours en « solidarité dynastique », nous retrouvons la distribution fortement contrastée des coûts d'abattement dès lors que les taux d'actualisation régionaux sont différents.

2.3. La distribution temporelle des coûts change par contre de nature

2.3.1. Toujours égalisation des coûts et des dommages marginaux à la période future

Sous incertitudes, les coûts marginaux d'abattement futurs $c^f(x^f)$ en univers coûts avantages sont maintenant conditionnels à l'état du monde futur réalisé. Dans chaque état du monde, nous retrouvons cependant le fait que ces coûts marginaux sont égaux aux dommages marginaux. D'une manière générale, nous retrouvons ainsi une égalité de la forme :

$$C^f(x_j^f) = - \sum_i d_{ij}'(x + x_j^f) \cdot I_i^f \quad (4.76)$$

En univers coûts avantages, l'introduction de l'incertitude ne change donc pas la nature de la décision de seconde période. Cette remarque n'est pas *a priori* surprenante, dans la mesure où la décision de seconde période est prise en toute connaissance de cause, et donc en univers certain.

doivent alors être construits comme une somme pondérée de l'inverse des utilités marginales du revenu présent correspondants à chacun des états du monde futurs possibles, mais ce point reste à vérifier.

¹⁶ Dans laquelle nous avons omis les indices *j* indiquant la dépendance à l'état du monde effectivement réalisé.

2.3.2. L'arbitrage entre coûts présents – coûts futurs devient par contre plus complexe

Du fait de l'introduction de l'incertitude sur l'état du monde futur, parler de distribution des coûts entre période présente et période future n'a plus de sens : il existe en effet autant de ratios différents que d'états du monde possibles. Cependant, l'analyse des conditions du premier ordre nous permet de faire émerger des règles qui contrôlent le rapport entre les coûts marginaux de réduction des émissions à la période présente et une moyenne pondérée des coûts marginaux de réduction des émissions à la période future. Nous n'examinerons ici que le cas de la « solidarité universelle », les conditions étant identiques en « solidarité dynastique » dès lors que les taux d'actualisation sont identiques.

Indiquons par j tous les termes qui peuvent effectivement dépendre de l'état du monde effectivement réalisé. En « solidarité universelle », le rapport entre coûts présents et coûts futurs s'écrit alors sous la forme suivante :

$$C'(x) = \varphi^n \cdot \sum_j p_j \cdot \frac{\frac{dU_i}{dc}(y_i)}{\frac{dU_i^f}{dc^f}(y_{ij}^f)} \cdot \frac{\frac{dU_i^f}{dc^f}(y_{ij}^f - a_{ij}^f)}{\frac{dU_i}{dc}(y_i - a_i)} \cdot C_j^f(x_j^f) \quad (4.77)$$

Cette équation est analogue aux équations (4.27) et (4.32) obtenues précédemment, à la différence près que l'équilibre s'établit maintenant avec la moyenne pondérée des coûts de réduction des émissions. Or en raison de la convexité des fonctions de coûts marginaux de réduction des émissions, le niveau de réduction des émissions « équivalent » au terme de droite, c'est-à-dire tel que son coût marginal soit égal à la somme pondérée des coût marginal, est supérieur à la somme pondérée des niveaux de réduction des émissions dans chacun des états du monde possibles.

En d'autres termes, l'abattement équivalent est supérieur à la moyenne des abattements, ce supplément n'étant pas dû à une quelconque aversion pour le risque, mais simplement à la forme des courbes de coût marginal de réduction des émissions, qui font que les niveaux d'abattement les plus élevés ont un poids prépondérant. Nous retrouvons ici un résultat déjà observé au chapitre 2.

Pour examiner ce phénomène, nous supposons d'une part que l'incertitude porte uniquement sur les niveaux de dommages (ou sur les plafonds de réduction des émissions) et que les coûts de réduction des émissions présents et futurs (ainsi que les dommages le cas échéant) dans tous les états du monde possibles restent petits devant les revenus futurs, alors la relation (4.77) se simplifie en :

$$C'(x) = \varphi^n \cdot \sum_j p_j \cdot C_j^f(x_j^f) \quad (4.78)$$

Comme les coûts marginaux de réduction des émissions sont des fonctions convexes, le niveau de réduction d'émissions futures x^f équivalent à la somme pondérée des x_j^f , c'est-à-dire tel que le coût marginal de x^f soit égal à la moyenne pondérée des coûts marginaux des x_j^f vérifie l'inégalité :

$$x^f > \sum_j p_j \cdot x_j^f \quad (4.79)$$

Nous pouvons évaluer cet écart en détournant le calcul classique de l'aversion au risque. En supposant que la dispersion des x_j^f reste faible et en notant x_m la moyenne pondérée des x_j^f :

$$x^f - x_m \approx \frac{1}{2} \sigma^2 \frac{C_j^{f'''}(x_m)}{C_j^{f''}(x_m)} \quad \text{avec } \sigma^2 = \sum_j p_j \cdot (x_j^f - x_m)^2 \quad (4.80)$$

La dispersion des niveaux d'abattement par rapport à leur valeur moyenne s'avère ainsi le point déterminant de l'écart entre le niveau d'abattement équivalent et la moyenne pondérée des niveaux. Si nous regardons la différence en termes de coûts marginaux, ce qui est plus significatif, nous obtenons :

$$\frac{C^f(x^f) - C^f(x_m)}{C^f(x_m)} \approx \frac{1}{2} \frac{\sigma^2}{x_m^2} \frac{C^{f'''}(x_m)}{C^f(x_m)} \quad (4.81)$$

Numériquement, pour deux états du monde futurs équiprobables dans lesquels les niveaux d'abattement futurs sont respectivement de +10% et -10% par rapport à la moyenne x_m , et pour des coûts marginaux de réduction des émissions croissant comme le carré des niveaux de réduction, les coûts marginaux de réduction des émissions « équivalents » ne sont que de 0,5% plus élevés que les coûts marginaux de la moyenne x_m . Si par contre l'incertitude sur les dommages conduit finalement à une fourchette de -50%, +50% pour les niveaux d'abattement futurs par rapport à la moyenne, alors les coûts marginaux de réduction des émissions s'accroissent de 25% par rapport à ceux de la moyenne, ce qui est considérable. Or si nous pensons par exemple à l'incertitude sur le plafond de concentration (entre 450 ppm et 650 ppm), c'est la seconde fourchette qui est la plus pertinente.

En résumé, la présence d'incertitudes sur les niveaux de dommages, les revenus futurs ou les fonctions de coûts de réduction des émissions futures ne change donc pas radicalement les règles de répartition des efforts de réduction des émissions au sein d'une même génération et entre génération. Ces règles, et en particulier les règles intragénérationnelles, apparaissent donc comme des conditions d'équilibre particulièrement robustes.

Conclusion

Parvenus au terme de cette discussion, nous sommes maintenant en mesure de tirer deux enseignements de l'extension du modèle de Bowen, Lindhal et Samuelson à un bien public futur et incertain. En premier lieu, la coordination des taux d'actualisation régionaux apparaît comme une condition nécessaire pour qu'il soit possible de faire émerger des règles de répartition des coûts d'abattement qui soient différentes du « tout ou rien ». En second lieu, la séparabilité entre distributions temporelles et spatiales des coûts d'abattement est assurée dès lors que les consommations de biens à deux dates différentes sont indépendantes. Nous revenons maintenant dans le détail sur chacune de ces deux conclusions.

La notion de bien public futur tout d'abord apparaît plus complexe et plus riche que nous ne l'avions supposé au départ. Nous sommes en effet partis d'une remarque triviale : le bien public « qualité de l'atmosphère » est utilisé (ou « consommé ») très longtemps après avoir été « produit » par les émissions de gaz à effet de serre. Contrairement au cas d'un bien public « immédiat » étudié par Bowen, Lindhal et Samuelson, le choix d'un niveau d'émissions optimal dépend d'arbitrages à la fois intra et inter générationnels. De ce fait, la manière dont le bien-être des générations est pris en compte devient primordiale, tout comme la nature des hypothèses formulées sur l'évolution de l'économie et des comportements.

Une difficulté supplémentaire surgit encore lorsque la production du bien public, et non plus seulement sa consommation, est partagée entre la génération présente et la génération future. Dans ce contexte, la cohérence des taux d'actualisation régionaux à long terme devient critique pour assurer que la distribution des contributions à la production du bien public ne soit pas de nature binaire, c'est-à-dire de la forme « on paie tout ou on ne paie rien ».

- Dans l'hypothèse de « solidarité dynastique », un planificateur est supposé fixer un taux d'actualisation commun pour l'ensemble des individus de la planète. Dans ce cadre, et si les poids de chacune des régions à chaque période sont choisis de manière correcte, il est possible de déboucher sur une distribution des dépenses d'abattement ne soit pas binaire. En particulier, si

nous choisissons les poids dits « de Negishi », alors chaque agent contribue à hauteur de sa richesse.

- Dans l'hypothèse de « solidarité universelle », il n'y a au contraire pas d'accord sur un taux d'actualisation commun. Nous constatons alors qu'à au moins une période, les contributions sont distribuées de telle sorte qu'une région prenne en charge l'ensemble du financement du bien public alors que les autres ne paient rien. Une telle configuration présente en pratique toutes les chances d'être rejetée par les Parties en négociation.

Ces résultats soulignent ainsi la nécessité d'un arbitrage international sur les taux d'actualisation à long terme. Or, comme nous l'avons vu au premier chapitre, se coordonner sur les taux revient en fait à se coordonner sur des « visions du monde » différentes caractérisées par des hypothèses sur la croissance économique future et sur les comportements, ainsi que sur une « préférence pure pour le présent ». Nous reviendrons largement dans la troisième partie de cette thèse sur les enjeux d'une telle coordination.

De manière plus immédiate, cette nécessaire coordination des taux d'actualisation appelle une discussion approfondie des systèmes de « *banking* », parfois évoqués à l'échelle internationale, et donnant la possibilité à tout pays d'anticiper ou au contraire de retarder ses efforts de réduction des émissions. Suite à la discussion que nous venons de mener, il faudrait maintenant examiner dans quelle mesure le « *banking* » permettrait de réduire, ou au contraire contribuerait à exacerber les tensions liées aux écarts entre taux d'actualisation régionaux.

Il nous reste maintenant à conclure sur la validité de l'hypothèse d'orthogonalité entre les distributions spatiales et temporelles des coûts d'abattement que nous avons implicitement formulée dans la première partie en développant un modèle à un seul agent représentatif par génération. D'un point de vue formel, nous obtenons le résultat suivant : cette séparation est vérifiée dès lors que les consommations présentes et futures sont supposées indépendantes dans toutes les fonctions d'utilité intertemporelle régionales. Cependant, cette séparabilité ne saurait en pratique être obtenue si la question de la coordination des taux d'actualisation internationaux n'a pas été résolue au préalable. Nous pouvons ainsi réinterpréter l'hypothèse de « l'agent représentatif » que nous avons formulée dans toute la première partie comme une traduction de cette mise en cohérence des taux d'actualisation.

Si la distribution temporelle des coûts d'abattement est en général indépendante de la distribution temporelle des coûts d'abattement, elle l'est aussi en général de la distribution régionale des dommages. De manière naturelle, cette condition n'est plus vérifiée dès lors que le pays considéré subit déjà des dommages importants. Du point de vue de la négociation, ce résultat est très important car il constitue un argument puissant à l'appui de la déconnexion du débat sur la distribution des coûts d'abattement, et de celui sur la distribution régionale des dommages.

En troisième lieu, il apparaît que l'incertitude ne modifie pas les conditions de la séparabilité entre distributions spatiales et temporelles des coûts d'abattement. La distribution des efforts est en effet toujours optimale si les utilités marginales de la consommation pondérées par les poids de la fonction d'utilité sociale intertemporelle sont égales. Cette règle reste valable que ce soit pour la génération future ou pour la génération présente, quel que soit l'état du monde finalement réalisé. L'incertitude modifie par contre la décision à deux niveaux :

- D'une part, nous retrouvons le fait que la quantité de bien public à produire lors de la première période dépend maintenant des probabilités subjectives sur les états du monde futur et de la vitesse de décroissance de l'utilité marginale de la consommation. Cette dernière composante contribue à donner plus de poids aux scénarios futurs entraînant les dommages ou les coûts les plus élevés.

- D'autre part, si l'incertitude sur les taux de croissance ne présente conceptuellement aucune difficulté majeure, il est probable que l'accord sur un taux d'actualisation commun nécessaire au cadre de « solidarité dynastique » se révèle plus difficile à trouver dans ce cas de figure.

La séparabilité entre distributions temporelles et spatiales des coûts d'abattement étant confirmée, nous pouvons maintenant revenir au cadre d'un agent représentatif unique pour poursuivre la discussion sur l'écart entre la discussion sur le taux d'actualisation et le débat sur la distribution temporelle des coûts des politiques climatiques.

Chapitre 5 De la « préférence pure pour le présent » à la préférence pour le non sacrifice du présent

Nous avons terminé la première partie de cette thèse par une interrogation sur l'importance réelle du taux d'actualisation pour la distribution temporelle des coûts des politiques climatiques. Nos résultats numériques nous ont en effet montré que les trajectoires optimales de coûts de réduction des émissions présentent des pics quelle que soit la valeur du taux d'actualisation. En outre, en présence d'incertitudes, la valeur du taux d'actualisation apparaît comme nettement moins importante pour la décision de court terme que l'évaluation des risques d'une catastrophe climatique. En confirmant au niveau théorique la séparabilité entre distributions spatiales et temporelles des coûts d'abattement, le chapitre qui précède nous montre que ces résultats ne peuvent être expliqués par le simple fait que le modèle avec lequel nous les avons obtenus ne comprend qu'un seul agent représentatif par génération. En d'autres termes, la question de savoir si le débat court terme / long terme peut effectivement être résumé par la seule controverse sur le taux d'actualisation demeure.

Pour tenter d'y répondre, il nous faut revenir aux fondements théoriques du taux d'actualisation. Nous avons déjà entamé ce travail au premier chapitre, puisque nous avons montré que, dans un univers de premier rang, il y a deux raisons principales pour actualiser : d'une part la décroissance de l'utilité marginale du revenu qui implique, si nous anticipons une croissance économique positive, qu'un franc demain aura moins de valeur en termes d'utilité qu'un franc aujourd'hui, et d'autre part la « préférence pure pour le présent » qui traduit la manière dont la société apprécie le bien-être des générations futures (Arrow, 1995). Nous avons vu que le premier de ces deux facteurs d'actualisation, appelé « effet richesse » n'est pas *en soi* une variable de l'analyse. Il est au contraire explicitement lié à un jeu d'hypothèses relatives à l'évolution des préférences et aux anticipations sur la croissance future.

A ce stade de notre discussion, le second de ces deux termes reste par contre beaucoup plus mystérieux. En effet, le « taux de préférence pure pour le présent » est un paramètre de la fonction de bien-être intertemporelle qu'aucun lien évident ne semble rattacher aux autres hypothèses économiques ou comportementales nécessaires pour l'évaluation des politiques climatiques. Par conséquent, nous l'avons considéré comme une variable indépendante avec laquelle le modélisateur, ou le planificateur, pouvait jouer à sa guise. A première vue, nous tenons là un élément de réponse à notre interrogation. Le « taux de préférence pure pour le présent » apparaît en effet comme une variable du calcul économique susceptible de prendre en compte les choix éthiques et politiques vis-à-vis des générations futures. Ce serait donc le lieu où le débat court terme / long terme peut effectivement se traduire dans le calcul économique.

Cette représentation du « taux de préférence pure pour le présent » remonte à Frank Ramsey. Dans l'article fondateur de la théorie de la croissance publié en 1928, Ramsey utilise en effet un critère actualisé. Mais il s'empresse de choisir le taux d'actualisation de l'utilité égal à zéro au nom de l'égal traitement de la génération présente et des générations futures, ouvrant ainsi une controverse certainement aussi fameuse que sa théorie de la croissance. Nous montrerons cependant sur la base des travaux de Tjalling Koopmans que choisir un « taux de préférence pure pour le présent » nul ou très faible conduit logiquement à un sacrifice important de la génération présente dont il faut examiner l'acceptabilité. Nous verrons en outre que le même auteur fournit en outre une justification de nature axiomatique au critère de maximisation de la somme actualisée des utilités de la consommation, que nous nommerons dans la suite critère actualisé, et en même temps au fait que le « taux de préférence pure pour le présent » doive être choisi positif.

Mais au-delà du seul « taux de préférence pure pour le présent », le débat sur l'arbitrage entre court terme et long terme porte plus globalement sur la fonction de bien-être intertemporelle. Au nom de l'équité intergénérationnelle, certains auteurs proposent en effet des critères alternatifs (Rawls, 1971, Chichilnisky, 1996). D'autres auteurs font enfin l'observation suivante : les comportements réels des individus face à des choix intertemporels n'obéissent pas au modèle développé par Koopmans. Ils proposent alors d'autres formes de critères alternatifs dont nous étudierons les implications pour les choix collectifs.

Au terme de ce tour d'horizon, nous montrerons qu'il existe un ensemble d'arguments très forts plaçant pour l'utilisation d'un critère actualisé « classique » avec un taux d'actualisation de l'utilité strictement positif et plus proche de 2% à 4% que de 0%. La valeur de ce paramètre ne saurait être modifiée sans en évaluer les conséquences en termes de taux d'épargne. Ce dernier point nous permettra finalement de réinterpréter la « préférence pure pour le présent » comme une « préférence pour le non sacrifice du présent », nécessaire pour éviter à la génération présente des sacrifices trop importants au nom des « lendemains qui chantent ». Avec cette réinterprétation, nous argumentons du même coup que le « taux de préférence pure pour le présent » ne traduit qu'une partie seulement le débat sur l'arbitrage entre court terme et long terme¹.

1. Le critère actualisé

1.1. Une justification axiomatique : le théorème de Koopmans

L'utilisation d'une approche axiomatique pour examiner les fondement des critères de décision date du milieu du siècle environ. Dès 1944 en effet², Von Neumann et Morgenstern déduisent une représentation des préférences entre loteries d'un noyau d'axiomes de base (voir le chapitre 2). Dans les années 50, les travaux de Debreu (1954, 1959) fournissent des théorèmes de nature topologique très généraux sur les conditions sous lesquelles un jeu de préférence peut être représenté par une fonction d'utilité ordinale.

Dans son papier de 1960, l'économiste Hollandais Tjalling Koopmans applique cette méthode au choix entre plans de consommation intertemporels. Il suppose donc une relation de préférence sur les plans de consommation intertemporelle, dont il suppose qu'elle vérifie cinq postulats de base. Il en déduit que la fonction d'utilité intertemporelle qui représente ces préférences se présente nécessairement comme la somme actualisée des utilités de la consommation. Notons que dans le papier de 1960, la fonction obtenue est ordinale, et donc définie à une fonction affine près. Ce cadre sera étendu ensuite à une utilité cardinale dans un papier de 1964 avec Diamond et Williamson.

Nous nous proposons ici d'examiner en détail ce théorème pour comprendre d'où provient l'actualisation des utilités. Pour ce faire, nous écrivons puis commentons les cinq axiomes retenus par Koopmans avant d'examiner et de discuter le théorème.

1.1.1. Cinq axiomes pour le critère de décision intertemporel

Précisons tout d'abord les notations. Le temps est discrétisé en une infinité de périodes de longueur égale indicées par $t \in \{1, 2, 3, \dots\}$. Nous notons $x = \{x_1, x_2, \dots\}$ tout programme de consommation intertemporel infini et certain. Chaque élément x_t peut être en toute généralité un vecteur de

¹ Nous remercions Khalil Helioui, Cédric Philibert et Gilles Rotillon pour leurs commentaires sur des versions antérieures de ce papier.

² Dans son papier de 1960, Koopmans cite la contribution de R. Frisch [1926] "Sur un problème d'économie pure", Norsk Matematisk Forenings Skrifter, Serie 1, N°16, Oslo, 40p. comme le premier exemple d'utilisation de la méthode déductive en économie à sa connaissance.

consommation. Nous supposons ici que x_t reflète la quantité d'un unique bien composite consommé au cours de la période t , et donc que x_t est un réel positif. Nous noterons par ailleurs ${}_pX = \{x_p, x_{p+1}, \dots\}$ le programme de consommation tronqué à partir de la $p^{\text{ième}}$ période. L'ensemble de tous les programmes de consommation possible est un sous ensemble de $\mathbf{R}^\infty$ (produit infini de l'ensemble des réels). Il est muni de la norme sup (c'est-à-dire que pour deux éléments x et x' de X , $\|x-x'\| = \sup_t |x_t - x'_t|$) et est supposé borné³.

Le problème posé par Koopmans est le suivant. Etant donné un jeu de propriétés élémentaires des préférences, ce jeu est-il cohérent, c'est-à-dire permet-il de construire une relation de préférence sur X ? En outre, existe-t-il une fonction d'utilité intertemporelle U capable de représenter ces préférences, c'est-à-dire de vérifier la proposition suivante : x est préféré à x' si et seulement si $U(x) \geq U(x')$? Koopmans n'introduit pas directement la relation de préférence et travaille uniquement sur la fonction d'utilité U , dont il décrit les propriétés qu'elle devrait vérifier si la relation de préférence sous-jacente obéissait à certains axiomes. En termes mathématiques, son problème est donc de déterminer le contenu (éventuellement vide) de l'ensemble des fonctions caractérisées par les 5 propriétés suivantes :

Axiome K1 (complétude et continuité) : U est à valeur réelle, définie et quasi-uniformément continue⁴ sur l'ensemble des programmes possibles X .

Axiome K2 (sensibilité à la première période) : Il existe au moins deux programmes ne différant que par leur première période $x = \{x_1, x_2, \dots, x_n, \dots\}$ et $x' = \{x'_1, x_2, \dots, x_n, \dots\}$ tels que $U(x) > U(x')$.

Axiome K3 (non-complémentarité des consommations sur deux périodes successives) : Pour tous $x_1, x'_1, {}_2x, {}_2x'$:

$$(3a) \ U(x_{1,2}x) \geq U(x'_{1,2}x) \text{ implique } U(x_{1,2}x') \geq U(x'_{1,2}x')$$

$$(3b) \ U(x_{1,2}x) \geq U(x_{1,2}x') \text{ implique } U(x'_{1,2}x) \geq U(x'_{1,2}x')$$

Axiome K4 (stationnarité) : Pour tous $x_1, {}_2x$ et ${}_2x'$

$$U(x_{1,2}x) \geq U(x_{1,2}x') \text{ est équivalent à } U({}_2x) \geq U({}_2x')$$

Axiome K5 (existence d'extrêmes) : Il existe deux programmes extrêmes $\underline{x}$ et $\bar{x}$ tels que pour tout programme x , on ait

$$U(\underline{x}) \leq U(x) \leq U(\bar{x})$$

Examinons chacun de ces axiomes. Le premier impose la continuité de U . Il peut apparaître comme essentiellement technique, mais il est essentiel dans la mesure où l'ensemble d'arrivée $\mathbf{R}$ est nettement plus « petit » que l'ensemble de départ X , ce qui contraint fortement la forme de U . Pourtant, les conditions requises par l'axiome K1 sont assez naturelles :

- le fait que U soit à valeurs réelles est une condition nécessaire pour obtenir un critère complet, c'est-à-dire capable de discriminer deux à deux tous les plans de consommation. Si U était

³ En réalité, le papier initial de Koopmans (1960) stipule uniquement que X doit être connexe. Ce n'est que dans leur analyse de 1964 que Koopmans, Diamond et Williamson ajoutent que X doit être convexe et borné. Nous nous en tenons ici à un ensemble X borné afin de nous faciliter l'interprétation du postulat K5 de Koopmans. Cette hypothèse n'est de toute manière pas très contraignante dans la mesure où il est toujours possible de choisir un plafond de consommation très élevé.

⁴ Précisément, la fonction U est continue au sens suivant : pour tout réel u appartenant à $U(X)$, et pour tout $\varepsilon > 0$, il existe un $\delta > 0$ tel que pour tout x vérifiant $U(x) = u$ et pour tout x' dans X , $\|x-x'\| \leq \delta \Rightarrow |U(x) - U(x')| < \varepsilon$. Il s'agit d'une continuité uniforme sur tous les antécédents d'un même nombre réel.

autorisée à prendre des valeurs infinies, alors il ne serait plus possible d'assurer la comparaison entre tous les plans de consommation (on ne peut pas comparer deux infinies).

- La continuité est aussi une propriété assez naturelle des préférences, en ce sens que si une suite x_n de plans de consommation est préféré au plan x , alors la limite x des x_n devrait aussi être préférée ou indifférente à x ⁵.

Le second axiome impose une condition de sensibilité à la première période. Il élimine des critères de choix sensibles uniquement au très long terme, comme par exemple $\lim_{n \rightarrow \infty} u(x_n)$. Pour employer le vocabulaire de Chichilnisky (1996, voir section 2.2.1), l'axiome K2 revient à interdire toute « dictature du futur ».

Le troisième axiome impose l'indépendance entre les préférences à la première période et les préférences aux dates suivantes : il revient à empêcher toute complémentarité entre les biens à deux périodes successives. Il s'agit là d'une condition restrictive sur les préférences⁶. Par contre, rien n'interdit qu'il y ait complémentarité physique des consommations de biens à des périodes différentes. Elle se traduira alors par une limitation de l'ensemble des plans de consommation admissibles.

L'axiome K4 est certainement l'axiome le plus important avec l'axiome de continuité pour le résultat de Koopmans. Il impose en effet une condition de stationnarité à la fonction d'utilité intertemporelle U : les préférences entre deux plans de consommation ne changent pas du fait du simple passage du temps (toutes choses étant égales par ailleurs). Cette condition d'apparence naturelle est en réalité assez discutable, et les critiques du critère de Koopmans aboutiront pour la plupart à la rejeter *in fine* quel que soit le point de départ « éthique » ou « psychologue » de leur discussion⁷ (sections 2 et 3).

L'axiome K5 impose enfin que la fonction d'utilité intertemporelle soit bornée et qu'elle atteigne ses bornes. Comme nous avons choisi l'ensemble X des plans de consommation borné pour la norme sup, nous pouvons assimiler le programme $\bar{x}$ au programme où l'on consommerait constamment à chaque période le niveau de consommation maximal $x_{\max}$. Notons qu'à ce niveau général, ce programme n'a pas besoin d'être physiquement réalisable.

1.1.2. Enoncé des théorèmes

Koopmans démontre premier le théorème suivant :

⁵ Dans le cadre d'une fonction de bien-être social atemporelle, Chichilnisky (1982) donne deux arguments qui motivent le choix de la continuité : d'une part la règle est alors relativement peu sensible à des petites variations des préférences individuelles, d'autre part toute erreur dans l'identification des préférences s'avère moins importante, ce qui permet en particulier de fonder la construction de la fonction de bien-être social sur un échantillon partiel de la population. Elle démontre néanmoins que cette propriété n'est pas neutre pour la nature des choix sociaux ainsi dessinés. Il n'existe pas à notre connaissance de travail équivalent dans le cadre de fonctions de bien-être sociales intertemporelles.

⁶ Nous avons vu au chapitre 4 l'importance de cette condition. Pour une analyse détaillée des programmes de croissance avec complémentarité des consommations de biens à des dates différentes, le lecteur pourra consulter Ryder et Heal (1973).

⁷ Sans déflorer la question, il est facile de comprendre le problème engendré par l'axiome de stationnarité en considérant le cas suivant. Supposons que le programme consistant à consommer 1 tout de suite puis 0 jusqu'à la fin des temps (1,0,0,...) soit préféré au programme consistant à consommer 0 pendant un temps T fini, puis 1 jusqu'à la fin des temps (0,0,0,...,0,1,1,1,...), ce qui est automatiquement vérifié pour T assez grand le cas si la fonction d'utilité intertemporelle a la forme (5.1). L'axiome de stationnarité implique alors que le programme (0,1,0,...) est préféré à (0,0,...,0,1,1,1,...) et ainsi de suite. Or si l'on recule de T' périodes avec T' assez grand, le fait de préférer 1 de consommation à T' à une consommation infinie de 1 à partir de la date $T+T'$ devient pour le moins discutable.

Théorème 5.1 (Koopmans, 1960) : Si les axiomes K1 à K5 sont vérifiés, alors la fonction d'utilité U s'écrit sous la forme $U(x) = V(u(x_1), U_2(x))$ et vérifie au moins sur une partie de l'espace des programmes de consommation la condition d'impatience suivante :

$$\text{Si } u(x_1) > u(x_2), \text{ alors } U(x) > U(x_2, x_{1,3}x)$$

Mais c'est une extension de ce théorème aux critères de choix vérifiant en outre l'axiome (3') ci-dessous qui nous intéresse principalement :

Axiome K3' (non-complémentarité des consommations sur trois périodes successives) : Pour tous les $x_1, x_2, x_3, x'_1, x'_2$ et x_3' ,

$$(3'a) \quad U(x_1, x_2, x_3) \geq U(x'_1, x'_2, x_3) \text{ implique } U(x_1, x_2, x_3') \geq U(x'_1, x'_2, x_3')$$

$$(3'b) \quad U(x_1, x_2, x_3) \geq U(x'_1, x'_2, x_3') \text{ implique } U(x_1, x_2, x_3) \geq U(x'_1, x'_2, x_3')$$

Théorème 5.2 (Koopmans, 1960) : Si les axiomes K1 à K5 et K3' sont vérifiés, alors la fonction d'utilité U est, à une fonction affine près, de la forme $U(x) = \sum_{t=1}^{\infty} a^{t-1} u(x_t)$ avec $0 < a < 1$. (5.1)

Où u est une fonction à valeurs réelles, continue et croissante.

Le théorème 5.2 est particulièrement impressionnant. Des conditions d'apparence fort simples entraînent en effet un résultat très contraignant sur la forme de la fonction d'utilité intertemporelle U . Il n'est pas dans notre propos d'en reprendre ici la démonstration complète. Nous allons simplement mettre en évidence les idées principales du raisonnement.

Dans ce but, il est utile de ne pas examiner toutes les fonctions U possibles, mais de se restreindre aux sommes pondérées des utilités de la consommation à chaque période (équation 5.2 ci-dessous). Remarquons alors que si a_1 n'est pas nul et si u n'est pas une fonction constante, alors les axiomes K2 (sensibilité à la première période), K3 (non-complémentarité des consommations à deux périodes successives) et K3' (non complémentarité des consommations à trois périodes successives) sont automatiquement vérifiés. Il nous reste à examiner les conséquences sur les poids a_t des axiomes K1 (continuité) et K4 (stationnarité), laissant l'axiome K5 pour une discussion ultérieure.

$$U(x) = \sum_{t=1}^{\infty} a_t \cdot u(x_t) \quad (a_t \geq 0) \quad (5.2)$$

Consacrons-nous dans un premier temps à l'axiome K1. Si U est de la forme (5.2), alors le simple fait que U soit à valeurs réelles (première partie de l'axiome K1) a pour conséquence que la série des poids converge (c'est-à-dire que $\sum a_t < \infty$). De fait,

- les poids a_t ne sont pas égaux (sauf s'ils sont tous nuls, ce qui contredirait l'axiome K2), et
- les poids a_t tendent vers 0 lorsque t tend vers l'infini.

Notons que ce résultat est indifférent au fait que les utilités de la consommation soient ou non bornées. Il découle uniquement du nombre infini de périodes sur lequel nous travaillons.

Comme nous l'avons déjà évoqué, la raison en est que l'ensemble des réels qui nous sert d'échelle de mesure est nettement plus « petit » que l'ensemble des plans infinis de consommations. Comme l'écrit Koopmans, « *Intuitively, the reason is that there is in all circumstances a preference for postponing*

satisfaction – or even neutrality toward timing – then there is not enough room in the set of real numbers to accommodate and label numerically all the different satisfaction levels that may occur in relation to consumption programs for an infinite future » (Koopmans, 1960, p.288). Autrement dit, le simple fait de rechercher un critère complet sur l'ensemble des plans de consommation infinis oblige à choisir des poids de plus en plus faibles pour l'utilité de la consommation à long terme⁸. Et il n'existe que deux manières d'éviter ce résultat : soit en levant l'exigence de complétude du critère, soit en se restreignant à des programmes de consommation finis.

L'ensemble des séries de poids a_t admissible reste cependant assez large. Mais si nous introduisons maintenant l'axiome K4 (stationnarité), seuls les poids exponentiellement décroissants restent possibles (c'est-à-dire les poids de la forme $a_t = \beta^{t-1}$ avec $0 < \beta < 1$, à un facteur multiplicatif strictement positif près). Intuitivement, la raison en est la suivante : l'axiome de stationnarité impose que l'évaluation des programmes de croissance soit essentiellement indépendants du temps. La perspective d'une période sur la suivante doit donc être identique qu'il s'agisse de la première et de la seconde, ou de la 50^{ème} et de la 51^{ème}. De fait, les rapports entre les poids a_2 et a_1 et les poids a_{51} et a_{50} (et plus généralement entre les poids a_{p+1} et a_p) doivent être identiques. Comme la suite des poids tend vers 0, ce rapport doit de plus être strictement plus petit que 1.

Nous pouvons maintenant revenir sur l'hypothèse simplificatrice consistant à postuler d'entrée que U est de la forme (5.2). Les axiomes K1, K2, K3 et K3' n'impliquent en aucune manière que U soit de la forme (5.2). Avec ces seuls axiomes, U pourrait très bien être une somme pondérée d'un critère à la (5.2) avec un critère sensible uniquement au comportement asymptotique de l'utilité de la consommation. C'est l'axiome de stationnarité (K4) qui exclue ces critères, que nous retrouverons dans l'analyse de Chichilnisky (section 2.2)⁹.

1.2. Impacts du critère actualisé dans un modèle de croissance

Le théorème de Koopmans ne met pas un terme à l'examen des critères de choix intertemporels. En effet, s'il procède d'axiomes relativement raisonnables, il reste pour le moment le produit d'une construction particulièrement abstraite dont il faut examiner les conséquences dans un modèle de croissance. En outre, le théorème 5.2 ne dit rien ni sur la fonction d'utilité à chaque période u , ni sur la valeur du facteur d'actualisation a (ou du taux d'actualisation de l'utilité δ équivalent, cf. équation 5.3 ci-dessous). Nous supposons ici que le première paramètre (la fonction u) est donné, et nous nous proposons avec l'analyse du comportement d'un modèle de croissance de cerner les plages de valeurs acceptables pour le second (δ).

$$\delta = \frac{1}{a} - 1 \quad (5.3)$$

1.2.1. Description d'un modèle de croissance simple

Nous suivons ici l'analyse menée par Koopmans (1965, 1968) en nous donnant une économie comportant une seule région et utilisant un seul bien composite qui sert à la fois de bien de consommation et de bien d'investissement. Ce bien est produit par la combinaison des facteurs de production capital et travail efficace notés respectivement K_t et L_t . La production $F(K_t, L_t)$ est ensuite répartie entre la consommation et l'investissement qui permet d'accroître le stock de capital qui se

⁸ Le fait que la suite des poids $\{a_t\}$ tende vers 0 n'implique pas qu'elle soit décroissante. Néanmoins, a_t peut être rendu aussi petit que souhaité dès que la période t est suffisamment lointaine.

⁹ Il nous semble intuitivement que les critères de Chichilnisky sont la famille la plus large de critères vérifiant 1, 2, 3 et 3'. Cette intuition demande cependant à être démontrée rigoureusement.

déprécie à un taux constant (noté η). En nous plaçant en temps continu, la dynamique de cette économie peut être formalisée de la manière suivante¹⁰ :

$$\dot{K}_t = F(K_t, L_t) - \eta \cdot K_t - C_t \quad \text{Dynamique d'accumulation du capital} \quad (5.4)$$

Nous ferons l'hypothèse que la fonction de production est à rendements constants. Nous supposerons d'autre part que la productivité marginale de chacun des facteurs est décroissante. Mathématiquement, nous supposerons que la fonction de production F est deux fois dérivable et vérifie les propriétés suivantes :

$$F(0, L) = 0, F(K, 0) = 0 \quad \text{Production nulle s'il manque 1 facteur} \quad (5.5)$$

$$F(aK, aL) = aF(K, L) \quad \text{Homogénéité de degré 1} \quad (5.6)$$

$$\frac{\partial F}{\partial K} > 0, \frac{\partial F}{\partial L} > 0, \frac{\partial^2 F}{\partial K^2} < 0 \quad \text{Productivité marginale du capital positive mais décroissante avec le capital, productivité marginale du travail positive} \quad (5.7)$$

$$\lim_{K \rightarrow \infty} \frac{\partial F}{\partial K}(K, L) = 0 \quad \text{La productivité du capital tend vers 0 si le capital s'accroît alors que le travail reste constant} \quad (5.8)$$

Nous supposons que le travail croît à un taux g constant indépendant de la marche de l'économie. Il est alors pratique de réécrire l'équation (5.4) en introduisant des grandeurs par tête. Le facteur L_t représentant la quantité de travail efficace de l'économie, il serait plus juste de parler de grandeurs par unité de travail efficace, mais nous conserverons par abus de langage l'expression « par tête ». En outre, du fait de l'hypothèse d'homogénéité de la fonction de production, celle-ci peut s'écrire comme le produit de la quantité de travail L_t par une fonction f dépendant uniquement du capital par tête. En notant k_t le capital par tête et c_t la consommation par tête, nous obtenons donc finalement :

$$\dot{k}_t = f(k_t) - (\eta + g) \cdot k_t - c_t \quad \text{Dynamique d'accumulation du capital par tête} \quad (5.9)$$

La fonction $\varphi(k_t) = f(k_t) - (\eta + g) \cdot k_t$ représente la production nette de capital par tête, une fois déduits les effets de la dépréciation du capital (terme η) et de l'accroissement du travail (terme g). Du fait des hypothèses formulées sur la fonction de production F , la fonction φ est nulle en 0. Elle croît ensuite avant de décroître à nouveau pour s'annuler pour une valeur $\bar{k} > 0$. Cette valeur s'interprète comme un capital par tête limite si grand que la production qu'il permet de générer est tout juste suffisante pour compenser l'accroissement de la population et la dépréciation du capital.

Soit k_0 le niveau de capital par tête initial de notre économie. Les trajectoires de croissance (c_t, k_t) qui vérifient à la fois $k_{t=0} = k_0$ et à tout instant l'équation (5.9) sont les dynamiques réalisables de l'économie. Une dynamique particulièrement importante est celle qui consiste à se placer au point de consommation par tête soutenable maximale, c'est-à-dire telle que c_t soit constante et maximale. Cette trajectoire stationnaire (c^*, k^*) est caractérisée par les deux équations suivantes :

$$\varphi'(k^*) = 0 \quad (5.10)$$

$$c^* = \varphi(k^*) \quad (5.11)$$

¹⁰ Mise à part l'expression en temps continu, le lecteur pourra vérifier qu'il s'agit du même modèle de croissance que celui développé dans la seconde section du chapitre 1.

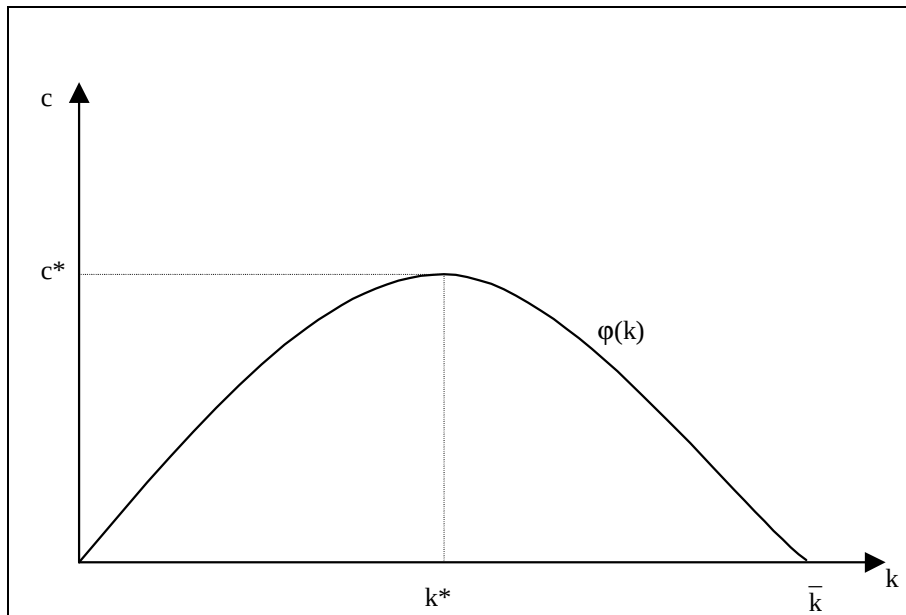


Figure 5.1 : Niveau de consommation par tête indéfiniment soutenable maximal dans le plan (k, c) . La courbe en cloche représente la fonction $\varphi(k)$.

Pour illustrer graphiquement la nature de la trajectoire (c^*, k^*) , il est utile de se placer dans le plan (k, c) . La courbe en cloche de la figure 5.1 représente la courbe d'équation $c = \varphi(k)$. Par définition de la production nette de capital, si nous nous plaçons à un niveau de capital k donné, et si nous choisissons de consommer précisément la quantité $c = \varphi(k)$ de bien composite, alors la quantité totale de capital de l'économie n'est pas modifiée. A l'instant d'après, il reste toujours une quantité k de capital par tête, ce qui autorise à consommer à nouveau c , et ainsi de suite. Nous pouvons donc suivre ici indéfiniment une trajectoire de consommation stationnaire. Le niveau de capital par tête k^* présente en outre la particularité d'être celui qui autorise la consommation par tête indéfinie la plus élevée.

Nous supposons maintenant que le capital par tête initial k_0 est petit devant k^* . Il existe une infinité de trajectoires admissibles vérifiant cette condition initiale. Il nous faut donc un critère permettant de discriminer ces trajectoires entre elles. Nous utilisons pour ce faire le critère actualisé. Nous recherchons donc la trajectoire qui maximise la fonction d'utilité sociale intertemporelle donnée par¹¹ :

$$W = \int_0^{\infty} u(c_t) \cdot e^{-\delta t} dt \quad \text{Critère de maximisation} \quad (5.12)$$

Nous supposons que la fonction d'utilité est croissante en c , et que l'utilité marginale de la consommation est décroissante. Nous posons de plus que l'utilité tend vers $-\infty$ lorsque la consommation tend vers 0, ceci afin d'éviter autant que faire se peut des niveaux de consommation trop faibles.

$$u'(c_t) > 0, u''(c_t) < 0, \lim_{c \rightarrow 0} u(c) = -\infty \quad (5.13)$$

Notons enfin que le choix d'une fonction d'utilité intertemporelle ne prenant pas en compte la taille de la population ne constitue pas une hypothèse très restrictive pour notre propos. Si nous avons en effet

¹¹ Koopmans (1960) démontre son théorème dans le cadre d'un modèle en temps discret. Nous n'en connaissons pas d'extensions formelles de son théorème en temps continu. L'analyse d'un modèle de croissance en temps continu ne constitue cependant à notre sens pas un problème dans la mesure où les résultats que nous obtenons peuvent être transposés dans le cas de modèles de croissance en temps discrets analogues à celui développé au chapitre 1.

considéré la maximisation de la somme totale des utilités à chaque période (5.14), le critère serait en fait identique au critère (5.12) avec un taux d'actualisation de l'utilité $\delta-g$.

$$W = \int_0^{\infty} L_t \cdot u(c_t) \cdot e^{-\delta t} dt \quad (5.14)$$

1.2.2. Résolution du modèle

Le programme de recherche de la trajectoire de croissance optimale par rapport au critère W est donc donné par les équations suivantes :

$$\text{Max} \int_0^{\infty} u(c_t) \cdot e^{-\delta t} \cdot dt \quad \text{Critère de maximisation} \quad (5.15)$$

$$\dot{k}_t = f(k_t) - c_t - (\eta+g) \cdot k_t \quad \text{Dynamique d'accumulation du capital} \quad (5.16)$$

$$0 \leq c_t \leq f(k_t) \quad \text{Bornes de la consommation} \quad (5.17)$$

$$k_{t=0} = k_0 \quad \text{Condition initiale sur le capital} \quad (5.18)$$

a) Théorème de Pontryaguine

Les mathématiques nous fournissent des outils puissants pour rechercher les extrêmes d'une fonction à une ou plusieurs variables réelles. Nous en avons fait abondamment usage dans le chapitre précédent. Le problème (5.15)-(5.18) est plus complexe dans la mesure où le critère à maximiser est défini sur un ensemble de fonctions. Le théorème de Pontryaguine¹² permet de résoudre ce problème en se ramenant à une infinité de petites maximisations de fonctions à variables réelles. Nous commençons précisément par définir le Hamiltonien réduit H du problème par :

$$H(k_t, c_t, p_t, t) = u(c_t) + p_t \cdot [f(k_t) - c_t - (\eta+g) \cdot k_t] \quad (5.19)$$

Le théorème de Pontryaguine stipule alors que s'il existe un contrôle optimal $c(t)$ du programme (5.15)-(5.18) continu par morceau, alors il doit vérifier les quatre conditions nécessaires suivantes :

$$\frac{\dot{p}_t}{p_t} = \delta + g + \eta - f'_k \quad (5.20)$$

$$\dot{k}_t = f(k_t) - c_t - (\eta+g) \cdot k_t \quad (5.21)$$

c_t maximise H à tout instant, c'est-à-dire :

$$\text{Soit } p_t = 0 \text{ et } c_t \text{ est maximale} \quad (5.22)$$

$$\text{Soit } p_t > 0 \text{ et } \frac{\partial H}{\partial c} = 0 \Leftrightarrow u'(c_t) = p_t \quad (5.23)$$

$$\lim_{t \rightarrow \infty} e^{-\delta t} \cdot p_t \cdot k_t = 0 \quad (5.24)$$

¹² Le lecteur trouvera un exposé complet du théorème de Pontryaguine dans Culioli (1994) ou dans Kamien et Schwartz (1991).

b) Interprétation économique des conditions nécessaires d'optimalité

L'équation (5.20) définit la dynamique de la variable adjointe p_t , qui peut être interprétée comme le prix implicite courant du capital. Le Hamiltonien H s'interprète alors comme l'utilité totale rapportée à chaque instant par la consommation et l'investissement. Les équations (5.22) et (5.23) traduisent simplement que c_t maximise cette quantité d'utilité à chaque instant. La condition (5.24) est enfin une condition de transversalité qui traduit le fait qu'à long terme, la valeur résiduelle du capital (mesurée en unités d'utilité rapportées à la date initiale), doit être nulle. Dans le cas contraire, il est possible d'augmenter la consommation pour exploiter cette manne.

L'équation (5.20) nous indique tout d'abord que le prix du capital diminue avec le temps, et ce d'autant plus vite que la productivité marginale nette du capital est élevée. De plus, l'égalité traduit le fait que l'on doit investir jusqu'à ce qu'à la marge, la valeur d'une unité supplémentaire de capital créé (donnée par $p_t \cdot (f'_k - \eta)$) soit exactement compensée par la baisse du prix induite par l'accumulation du capital ($\dot{p}_t$).

c) Système différentiel équivalent

Supposons pour le moment que le prix du capital n'est pas nul, et éliminons cette variable des équations (5.21)-(5.23). En réintroduisant la fonction de production nette $\varphi(k)$, les conditions nécessaires d'optimalité se réduisent finalement au système différentiel suivant :

$$\dot{k}_t = \varphi(k_t) - c_t \quad (5.25)$$

$$\frac{u''(c_t)}{u'(c_t)} \dot{c}_t = \delta - \varphi'(k_t) \quad (5.26)$$

La dynamique de ce système reste difficile à étudier dans le cas général. Pour avancer nous nous limitons au cas de fonctions d'utilité vérifiant la propriété (5.27). Le paramètre v contrôle la vitesse de décroissance de l'utilité marginale avec la consommation. Notons que dans le cas particulier $v=1$, nous retrouvons la fonction d'utilité logarithmique que nous avons utilisée dans le modèle STARTS développé au chapitre 1.

$$u'(c_t) = c_t^{-v} \quad \text{avec } v > 0 \quad (5.27)$$

Le système différentiel (5.25)-(5.26) s'écrit alors de la manière suivante :

$$\dot{k}_t = \varphi(k_t) - c_t \quad (5.28)$$

$$\frac{\dot{c}_t}{c_t} = \frac{\varphi'(k_t) - \delta}{v} \quad (5.29)$$

Arrêtons-nous un instant sur la signification du système que nous venons d'écrire. Il traduit les conditions nécessaires d'optimalité pour la trajectoire de croissance (k_t, c_t) . La première équation est évidente : pour que la trajectoire soit optimale, il faut d'abord qu'elle soit admissible, c'est-à-dire qu'elle vérifie la dynamique du capital du modèle de croissance. La seconde condition donne une règle pour choisir la consommation à chaque instant le long du sentier de croissance optimal : le taux de croissance instantané de la population multiplié par la courbure de l'utilité v doit en effet être égal à la productivité marginale nette du capital moins le taux d'actualisation de l'utilité.

Cette seconde condition peut se réécrire de la manière (5.30) suivante. Or le ratio $\dot{c}_t/c_t$ représente le taux de croissance de la consommation, et le terme $v = -c_t u''(c_t)/u'(c_t)$ est l'élasticité intertemporelle de l'utilité marginale de la consommation. Sachant qu'au premier rang, le taux d'actualisation d'une économie est égal au taux de productivité marginal du capital, nous vérifions ainsi la règle de décomposition du taux d'actualisation (1.2) que nous avons introduite au premier chapitre.

$$\phi'(k_t) = \delta + v \frac{\dot{c}_t}{c_t} \quad (5.30)$$

1.2.3. Résolution du modèle

Nous passons maintenant à la résolution du système différentiel (5.28)-(5.29). Notre objectif étant d'examiner la manière dont les trajectoires de croissance optimales évoluent avec le taux d'actualisation de l'utilité, nous considérerons successivement les cas $\delta > 0$ puis $\delta < 0$.

a) Solution stationnaire du modèle

Le système différentiel (5.28)-(5.29) présente une unique solution stationnaire non nulle que nous noterons $(\hat{k}, \hat{c})$ et défini par les équations suivantes (voir figure 5.2) :

$$\phi'(\hat{k}) = \delta \quad (5.31)$$

$$\phi(\hat{k}) = \hat{c} \quad (5.32)$$

La matrice Hessienne du système différentiel au voisinage du point $(\hat{k}, \hat{c})$ s'écrit :

$$H_{\hat{k}, \hat{c}} = \begin{bmatrix} \phi'(\hat{k}) & -1 \\ \hat{c} \cdot \phi''(\hat{k}) & 0 \end{bmatrix} \quad (5.33)$$

Cette matrice a deux valeurs propres, une négative et une positive. Le point $(\hat{k}, \hat{c})$ est donc un point selle. Cette analyse locale est confirmée par une analyse globale basée sur le sens de variation de k et de c dans les différentes zones de l'espace délimité par $(0 \leq k \leq \bar{k} \text{ et } 0 \leq c \leq f(k))$.

b) Trajectoire optimale dans le cas $\delta > 0$

Commençons par nous placer dans le cas $\delta > 0$. Nous avons alors $\hat{k} < k^*$. Nous supposons en outre que le capital initial par tête k_0 est « petit » et en particulier largement inférieur à $\hat{k}$. A partir de ce niveau de capital, la figure 5.3 nous montre qu'il existe plusieurs trajectoires de croissance qui vérifient le système différentiel (5.28)-(5.29) ainsi que la condition initiale (5.18). Le fait que plusieurs trajectoires vérifient ces conditions n'est pas étonnant : d'une part le système (5.28)-(5.29) ne constitue qu'un ensemble de conditions nécessaires (et non suffisantes) pour que la trajectoire (k_t, c_t) soit optimale, et d'autre part la condition (5.29) détermine le taux de croissance instantané de la consommation, mais ne dit rien sur le niveau de consommation initial.

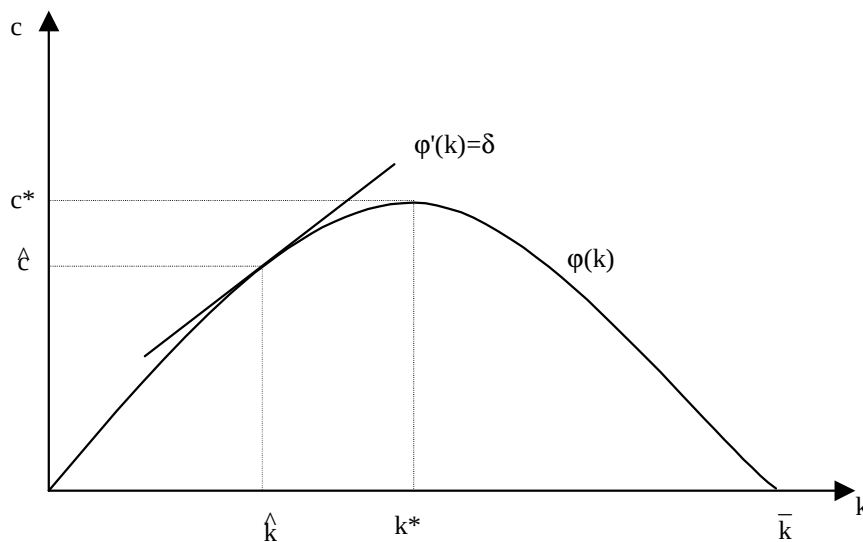


Figure 5.2 : Position de la solution stationnaire du système différentiel (5.28)-(5.29) dans le plan (k, c) dans le cas $\delta > 0$.

Considérons tout d'abord l'ensemble des solutions continues du système d'équations (5.18)-(5.28)-(5.29) représenté sur la figure 5.3. Ces solutions sont uniquement déterminées par la consommation initiale c_0 . Montrons que la meilleure de ces solutions au regard du critère de maximisation (5.15) est alors celle dont le niveau de consommation initial est $\hat{c}_0$, que nous noterons $(\hat{c}_t, \hat{k}_t)$.

- Soit en effet une trajectoire continue vérifiant (5.18)-(5.28)-(5.29) et débutant par $c_0 < \hat{c}_0$. La consommation sur la trajectoire qui est issue de ce point reste inférieure à tout instant à la consommation sur la trajectoire $(\hat{c}_t, \hat{k}_t)$. Comme par ailleurs l'utilité totale générée par le chemin $(\hat{c}_t, \hat{k}_t)$, et mesurée par l'intégrale (5.15) est finie, la trajectoire issue de $c_0 < \hat{c}_0$ est clairement non optimale.
- Soit maintenant une trajectoire continue vérifiant (5.18)-(5.28)-(5.29) et débutant par $c_0 > \hat{c}_0$. La consommation est initialement plus élevée que dans la trajectoire $(\hat{c}_t, \hat{k}_t)$. Par contre, la trajectoire atteint en temps fini la consommation maximale, ce qui entraîne finalement une diminution du capital et une consommation *in fine* nulle. Il s'agit à nouveau d'une trajectoire de consommation dont l'utilité totale est plus faible que celle de $(\hat{c}_t, \hat{k}_t)$.

La trajectoire $(\hat{c}_t, \hat{k}_t)$ est-elle optimale ? C'est assurément la trajectoire continue qui vérifie les conditions (5.18)-(5.28)-(5.29), ainsi d'ailleurs que la condition de transversalité (5.24), et qui maximise la somme actualisée des utilités (5.15). Il faut maintenant examiner des trajectoires présentant des points de discontinuité : comme par exemple consommer au départ une quantité de bien composite $c_0 < \hat{c}_0$, suivre la trajectoire continue décrite auparavant mais, une fois le niveau de capital par tête k^* atteint, passer brutalement à la consommation par tête c^* et rester ensuite dans cet état stationnaire. Koopmans (1965, 1968) montre cependant que de telles trajectoires restent sous optimales, et que la trajectoire optimale est effectivement $(\hat{c}_t, \hat{k}_t)$.

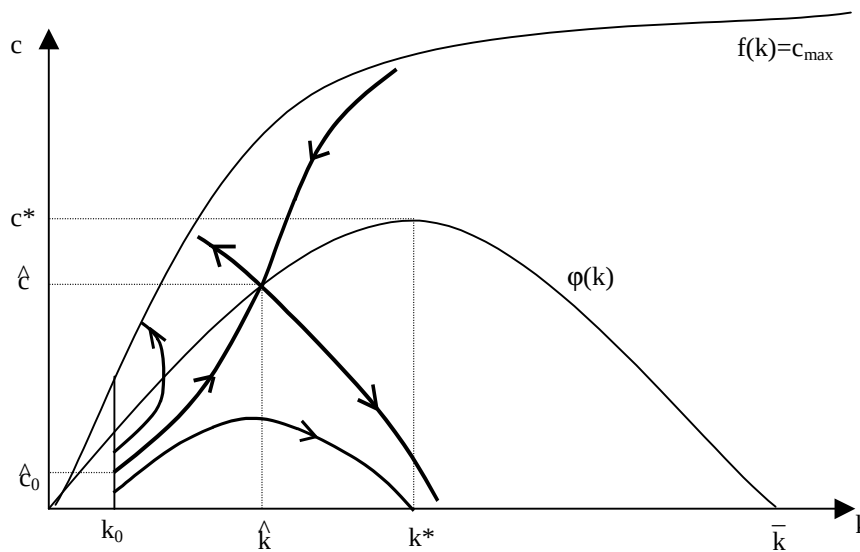


Figure 5.3 : Diagramme de phase du système dynamique (5.18)-(5.28)-(5.29) dans le cas $\delta > 0$.

Ce résultat peut s'énoncer comme suit : lorsque δ est strictement positif, alors de deux choses l'une :

- Soit le capital par tête initial est égal à sa valeur optimale $\hat{k}$, et alors la trajectoire optimale consiste à consommer indéfiniment $\hat{c}$.
- Soit le capital par tête initial est inférieur à sa valeur optimale $\hat{k}$, et alors la trajectoire optimale est la trajectoire $(\hat{c}_0, \hat{k}_1)$ qui débute à $\hat{c}_0$ et tend continûment vers $(\hat{c}, \hat{k})$, qu'elle atteigne en temps fini.

Ce résultat appelle deux commentaires. En premier lieu, et même lorsque le régime stationnaire $(\hat{c}, \hat{k})$ est atteint, la trajectoire de croissance optimale mène à un niveau de consommation inférieur à la consommation soutenable maximale c^* . La raison en est que, du fait du taux d'actualisation de l'utilité δ , le coût de l'investissement nécessaire pour rejoindre le niveau de capital par tête k^* est trop élevé pour être compensé par le gain futur de consommation.

En second lieu, les trajectoires continues vérifiant (5.18)-(5.28)-(5.29) mais telles que $c_0 < \hat{c}_0$ ou $c_0 > \hat{c}_0$ ne présentent *a priori* aucune propriété économique particulière. En particulier, et contrairement à ce que pourrait laisser penser une lecture trop rapide du diagramme de phase 5.3, il ne s'agit en aucun cas des trajectoires qu'il faudrait suivre si nous faisons au départ une « erreur » sur le niveau de consommation c_0 . En effet, si nous dépassons (respectivement restons en dessous) du niveau optimal de consommation pendant un intervalle de temps dt , alors le capital par tête augmente moins vite (respectivement plus vite). Nous nous trouvons alors à un nouveau niveau de capital par tête k_1 à partir duquel nous pouvons mener exactement le même raisonnement que précédemment. Autrement dit, en cas d'erreur, la solution optimale consiste à rejoindre le sentier de croissance $(\hat{c}, \hat{k})$.

c) Examen du cas $\delta < 0$

Dans le cas où $\delta < 0$, il n'est plus possible de résoudre directement le problème (5.15)-(5.18) : la somme actualisée des utilités est en effet divergente pour des trajectoires de croissance admissibles (par exemple pour le programme consistant à rester indéfiniment au point de coordonnées $(k_0, \varphi(k_0))$). Il reste néanmoins possible de rechercher un « meilleur » programme, par exemple au sens du critère du dépassement introduit par Von Weizsäcker (1965). Selon ce critère, une trajectoire de consommation

c_t est considérée comme meilleure qu'une trajectoire de consommation c'_t si et seulement si la somme actualisée entre l'instant initial et tout instant t assez grand de la différence des utilités est positive :

$$\exists T > 0 / \forall t > T, \int_0^t [u(c_t) - u(c'_t)] \cdot dt \geq 0 \quad (5.34)$$

La figure 5.4 présente le diagramme de phase du système (5.28)-(5.29) dans le cas $\delta < 0$. Il existe à nouveau une unique solution stationnaire $(\hat{c}, \hat{k})$, mais celle-ci est cette fois-ci située à droite de k^* . La trajectoire de croissance continue $(\hat{c}_t, \hat{k}_t)$ qui tend vers $(\hat{c}, \hat{k})$ est donc à l'évidence dominée par la solution discontinue consistant à suivre $(\hat{c}_t, \hat{k}_t)$ jusqu'à ce que le capital soit égal à k^* , puis à sauter à c^* et à rester indéfiniment à ce niveau de consommation par tête.

Cette trajectoire est cependant elle-même dominée par la solution consistant à augmenter le capital jusqu'à $\hat{k}$ puis à profiter de ce niveau élevé de capital pour jouir d'une consommation $f(\hat{k})$. La consommation étant alors supérieure à la productivité marginale nette de l'économie, le capital décroît (flèche en gras en haut de la figure 5.4) pour revenir à la valeur k^* , où l'on atteint c^* . Dans ses travaux de 1965 et de 1968, Koopmans montre du fait du taux de préférence pure pour le présent négatif, et donc de la valorisation exponentiellement croissante de l'utilité de la consommation future, cette trajectoire est d'autant plus intéressante que la date à laquelle l'économie décide de profiter de la consommation maximale $f(\hat{k})$ est retardée. A la limite, l'économie reste indéfiniment au point $(\hat{c}, \hat{k})$ et ne profite jamais de la consommation très élevée qu'il projette : il n'y a donc pas de trajectoire de croissance optimale pour le problème (5.15)-(5.18) lorsque δ est négatif.

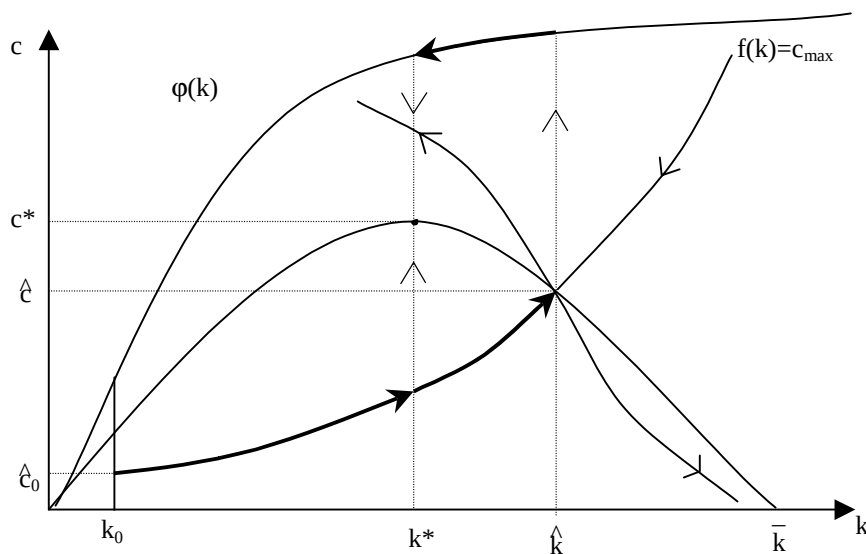


Figure 5.4 : Diagramme de phase du système (5.28)-(5.29) dans le cas $\delta < 0$

Pour reprendre une image donnée par Koopmans (1968) et reprise par Arrow (1995, 1999). « *Imagine initially that output consists of a constant stream of completely perishable goods. There can be no investment by definition. Now imagine that an investment opportunity occurs, available only to the first generation. For each unit sacrificed by them, a perpetual stream of α per unit time is generated. If there were no time preference, what would the optimal solution be?* » (Arrow, 1999, p.14).

Le cas où $\delta=0$ est le cas limite, dans lequel il existe une trajectoire optimale (qui aboutit à c^*). Mais ce résultat disparaît s'il est tenu compte dans la fonction d'utilité intertemporelle de la croissance de la population (dans ce cas, le taux δ doit être supérieur ou égal au taux de croissance de l'économie).

1.2.4. Pour quel taux d'épargne ?

La discussion qui précède nous a permis de montrer que le modèle de croissance que nous avons développé n'avait de solution optimale que pour un taux d'actualisation de l'utilité $\delta > 0$. Il nous reste maintenant à examiner numériquement ces solutions. Sans calculer l'ensemble de la trajectoire de croissance, le taux d'épargne à l'équilibre constitue un bon indicateur.

Nous faisons tout d'abord l'hypothèse que F est une fonction de Cobb-Douglas, avec un poids α pour le capital et $1-\alpha$ pour le travail. Le taux d'épargne optimal $\hat{s}$ au point $(\hat{c}, \hat{k})$ est alors donné par l'expression suivante¹³ :

$$\hat{s} = \alpha \cdot \frac{\eta + g}{\delta + \eta + g\nu} \quad \text{Taux d'épargne optimal à l'équilibre} \quad (5.35)$$

Nous reprenons ici les hypothèses que nous avons retenue pour la calibration du modèle STARTS au chapitre 1 (Manne, 1995). Soit $\eta = 3\%$, $\alpha = 0,38$, $g = 2\%$ et $\nu = 1$ (fonction d'utilité logarithmique).

Valeur de δ	Taux d'épargne optimal
0%	38%
1%	32%
2%	27%
3%	24%
4%	21%
5%	19%

Tableau 5.1 : Variation du taux d'épargne optimal en fonction du taux d'actualisation de l'utilité δ (fonction de production logarithmique, $\alpha = 0,38$, $g = 2\%$).

Le tableau 5.1 nous donne les taux d'épargne à l'équilibre. Il est à noter que les taux d'épargne sur le chemin optimal de transition vers l'équilibre sont plus élevés afin de permettre une accumulation du capital. Nous observons en particulier que pour le jeu de valeurs que nous avons choisi, le taux d'épargne dépasse 25% dès que le taux δ est inférieur à 3%. Ce résultat n'est invalidé que si le taux de croissance et le taux de dépréciation du capital sont suffisamment faibles (précisément si leur somme est inférieure à 4%) ou si le paramètre ν est strictement supérieur à 1.

Or le taux d'épargne d'un pays comme la France est aujourd'hui de 16% environ. Au cours des trente dernières années, il apparaît que ce paramètre est resté relativement stable dans les pays développés (entre 18% et 25%). Seuls les pays émergents comme le Japon ou la Corée du Sud ont connu, au plus fort de leur croissance, des taux d'épargne dépassant 30% sur des périodes longues (World Bank Data, 1994).

De fait, si le paramètre δ est inférieur à 3%, alors la trajectoire de croissance optimale du modèle de croissance simple que nous avons utilisé fait apparaître des taux d'épargne à long terme nettement plus élevés que ceux que nous observons depuis 40 ans dans les principaux pays développés. L'utilisation d'un taux δ trop faible aboutit donc à des prescriptions *a priori* difficilement acceptables. Il est certes possible de contester la pertinence du modèle de croissance utilisé, mais la tendance à la hausse du taux d'épargne en fonction du taux δ est une propriété mathématique fondamentale qui ne dépend pas de la spécification précise du modèle économique sous-jacent.

¹³ Le lecteur pourra s'en convaincre sans difficulté en éliminant le capital par tête k_t du système (5.31)-(5.32) définissant la solution stationnaire.

1.3. Conclusion

A ce stade de la discussion, le critère de choix de Koopmans avec taux d'actualisation positif apparaît comme un candidat particulièrement solide pour arbitrer les choix intertemporels en univers certain. Il découle, en amont, d'axiomes raisonnables sur les choix collectifs. Il génère d'autre part en aval des trajectoires de croissance à la fois positives et *a priori* acceptables en termes de taux d'épargne. Plus encore, nous n'avons à aucun moment eu besoin de faire référence à la nature du décideur auquel nous nous intéressons, l'axiomatique de Koopmans pouvant être retenue pour caractériser aussi bien les décisions individuelles que les décisions collectives.

Mais c'est précisément dans chacune de ces dimensions individuelles et collectives le critère de Koopmans trouve ses critiques. D'un point de vue collectif tout d'abord, la présence d'un taux δ strictement positif, et donc d'un poids plus faible accordé aux générations futures, apparaît indéfendable aux yeux de certains auteurs. L'aporie mathématique de l'infini constitue cependant, comme nous le verrons dans la section 2, un obstacle difficile à franchir. D'un point de vue individuel ensuite, de nombreuses études empiriques montrent que les agents individuels ne se conforment pas aux axiomes de Koopmans, et à l'axiome de stationnarité en particulier : ils utilisent en effet un taux d'actualisation implicite décroissant avec l'horizon temporel considéré. Nous examinerons en section 3 les arguments en faveur d'une généralisation de ce concept aux choix de politiques publiques.

2. « On ne peut donner moins de poids aux générations futures ! »

L'une des caractéristiques fondamentales du critère de Koopmans est d'affecter aux utilités des périodes futures des poids qui tendent vers zéro à long terme. Cette propriété est considérée comme moralement inacceptable par de nombreux auteurs qui ne voient aucune justification éthique à une telle inégalité de traitement entre la génération présente et les générations futures.

Dès 1928, Frank Ramsey écrit ainsi « *We do not discount later enjoyments in comparison with earlier ones, a practice which is ethically indefensible and arises merely from the weakness of our imagination* » (p.543). Sir Roy Harrod définit quant à lui la « préférence pure pour le présent » comme « *a polite expression for the rapacity and conquest of reason by passion* » (1948, p.40). Plus récemment, mais avec moins de style, William Cline (1992) affirme que « *Impatience or "myopia" may be a legitimate basis for a single individual's preferring consumption earlier rather than in his lifetime, but from the society's standpoint it is hardly a justifiable basis for making intergenerational comparisons.* » (p.249).

Deux raisons profondes justifient pourtant ce choix. La première est de nature logique : un taux d'actualisation négatif ou nul ne permettrait pas de classer avec un seul nombre réel tous les programmes de consommation infinis. La seconde est de nature économique : l'usage d'un taux δ négatif ou nul dans des modèles de croissance conduit la plupart du temps à l'absence de programme optimal, et dans tous les cas à des taux d'épargne très élevé dont l'acceptabilité politique et sociale est discutable. Il est donc nécessaire d'évaluer les critères alternatifs à l'aune de ces deux questions : mathématique d'une part et économique de l'autre.

2.1. Le critère du mini-max

La publication de la *Theory of Justice* par John Rawls en 1972 a constitué un événement majeur dans l'univers des sciences morales. Rawls entend en effet fonder la justice distributive non plus sur des intuitions, ou sur quelque théorie téléologique, fût-elle utilitariste, prétendant reconnaître un « bien » qui devrait être maximisé, mais sur une doctrine du contrat social. Selon lui, les principes de la justice distributives devraient être ceux que concevraient des personnes libres et rationnelles gouvernées par leur intérêt personnel si elles devaient décider des règles et institutions qui encadrent leur vie sociale

en étant derrière le « voile de l'ignorance », c'est-à-dire dans l'ignorance de leurs capacités, de leurs conceptions du bien, de leur position dans la société et du niveau de développement de la société dont elles seront membres.

Placés dans cette position d'ignorance, les individus devraient selon Rawls choisir les deux principes suivants, le premier étant prépondérant sur le second : « *First principle: Each person is to have an equal right to the most extensive total system of equal basic liberties compatible with a similar system of liberties for all. Second principle: Social and economic inequalities are to be arranged so that they are both (a) to the greatest benefit of the least advantaged, consistent with the just savings principles, and (b) attached to offices and positions opened to all under several conditions of fair equality of opportunity.* » (p.302). Pour l'économiste, le point (a) du second chapitre présente évidemment le plus grand intérêt. Sa traduction en termes de distribution des richesses au sein d'une même génération est claire : Rawls défend un principe du « maxi-min » qui consiste à faire en sorte que le bien-être de la personne la moins bien lotie soit le plus élevé possible. L'interprétation des principes généraux de Rawls pour distribution des richesses entre générations se révèle par contre difficile, et a donné lieu à de nombreuses exégèses.

Le texte de Rawls ne permet en effet pas de trancher sans hésitation¹⁴ : « *The (choosing) parties do not know which generation they belong to [...] They have no way of telling whether it is poor or relatively wealthy, largely agricultural or already industrialized [...]. Thus the persons in the original position are to ask themselves how much they would be willing to save at each stage of advance on the assumption that all other generations are to save at the same rates. That is, they are to consider their willingness to save at any given phase of the civilization with the understanding that the rates they propose are to regulate the whole span of accumulation. Since no one knows to which generation he belongs, the question is viewed from the standpoint of each and a fair accommodation is expressed by the principle adopted. All generations are virtually represented in the original position, since the same principle would always be represented. Only those of the first generation do not benefit [...] for while they begin the whole process they do not share in the same fruits of their provision. Nevertheless, since it is assumed that a generation cares for its immediate descendants, as fathers care for their sons, a just savings principle [...] would be adopted.* » (p.287-288).

L'interprétation la plus rapide, sinon la plus pertinente, du texte de Rawls consiste à adopter pour principe de distribution temporelle des richesses le même critère « mini-max » que pour leur distribution au sein d'une même génération. Mais comme la montre Robert Solow dans une analyse très fouillée (1974), l'utilisation de ce critère dans un modèle de croissance induit des trajectoires peu satisfaisantes. Si le taux de croissance du travail efficace est aussi celui de la population, la trajectoire optimale au sens du critère « mini-max » du modèle de croissance développé dans la première section consiste à consommer indéfiniment la quantité de bien composite $c_0 = \phi(k_0)$: la consommation par tête est alors constante. Si le taux de croissance du travail efficace est plus élevé que celui de la population, alors le programme consiste à nouveau à choisir un niveau de consommation par tête constant, mais plus élevé que précédemment, de sorte que la dépréciation progressive du capital soit exactement compensée par le progrès technique. Le critère du « mini-max » s'avère ainsi fortement dépendant de l'état initial de l'économie : en particulier, si l'économie est pauvre, le programme optimal consiste à rester dans cette trappe de pauvreté.

Une seconde interprétation de la « juste épargne » de Rawls consiste à formuler avec Dasgupta (1974) l'hypothèse selon laquelle chaque génération portera un intérêt au bien-être de ses descendants, indépendamment de ses motivations éthiques particulières. Formellement, le bien-être de chaque génération dépend donc maintenant de son propre niveau de consommation ainsi que de celui de ses descendants, soit (5.36), où β représente le degré d'intérêt porté au bien être de la génération future :

$$U(C_t, C_{t+1}) = V(C_t) + \beta \cdot V(C_{t+1}) \quad (5.36)$$

¹⁴ Le lecteur trouvera une discussion approfondie sur la manière dont Rawls se positionne par rapport au critère actualisé dans Philibert (1997).

Faire ainsi dépendre l'utilité d'une génération de celle de ses descendants directs autorise un raisonnement de théorie des jeux non coopérative : est juste un programme d'épargne tel que toute génération ait intérêt à l'adopter si elle sait que tous ses descendants l'adopteront. Mais Dasgupta démontre que l'équilibre de Nash ainsi obtenu est une trajectoire à taux de croissance positif, mais qui se révèle Pareto inefficace. Or Dasgupta et Heal (1979) soulignent que des personnes ignorant la génération à laquelle elles appartiendront et sachant simplement que leur bien-être sera croissant avec leur consommation auront une forte propension à choisir des trajectoires de croissance efficaces.

Le principe de « juste épargne » se révèle ainsi difficile à traduire en pratique. Le critère du « mini-max » semble *a priori* le plus apte à représenter la combinaison d'une incertitude totale sur la génération à laquelle chaque personne appartient et d'une négociation fondée sur le seul intérêt particulier. Cependant (par conséquent ?), il présente deux difficultés pratiques : « (a) *It requires an initial capital stock big enough to support a decent standard of living, else it perpetuates poverty [...]* and (b) *it seems to give foolishly conservative injunctions when there is stationary population and unlimited technical change.* » (Solow, 1974, p.41). L'approche de type théorie des jeux non coopérative développée par Dasgupta ne semble pas, en tant que traduction du principe de Rawls, plus prometteuse¹⁵. En revanche, le fait de casser la symétrie totale introduite par le voile de l'ignorance en postulant, ce qui semble raisonnable, que l'utilité de chaque génération dépend de celle de ses descendants ouvre une voie intéressante. Le critère du « mini-max » peut en effet alors générer des taux de croissance positifs dès lors que la préoccupation pour les descendants est suffisamment élevée (Henry, 1997)¹⁶. Ces travaux demandent cependant à être généralisés avant que le critère du « mini-max » ne puisse constituer une alternative solide au critère actualisé.

2.2. Une axiomatique de la soutenabilité : le critère de Chichilnisky

Chichilnisky (1996) aborde la critique du critère actualisé d'une manière différente. Par rapport au critère du « mini-max », la question n'est plus d'assurer l'égale prise en considération de toutes les générations, mais simplement de faire en sorte que les intérêts de la génération présente et les intérêts de l'ensemble des générations futures soient pris en compte en même temps dans la fonction d'utilité sociale. Pour ce faire, elle définit deux axiomes symétriques aux titres particulièrement éloquents : « non-dictature du futur » et « non-dictature du présent » qu'elle impose aux fonctions d'utilité intertemporelles. En ajoutant une condition de continuité et de non-complémentarité, elle obtient ainsi

¹⁵ Dasgupta et Heal (1979) remarquent que décider derrière le voile de l'ignorance revient à prendre une décision sous incertitude. Cependant, ce cadre n'est pas très utile pour une personne ignorant quelle place elle occupera dans une infinité de générations. Pour briser la symétrie, Dasgupta et Heal introduisent alors l'idée selon laquelle l'économie aura une fin à une date inconnue, mais dont la probabilité augmente avec le temps. Ils débouchent alors sur un critère de décision analogue à un critère actualisé, à la différence près que les poids traduisent la probabilité croissante de la fin du monde. Cette approche, aussi utilisée comme argument pour justifier une « préférence pure pour le présent » positive nous semble cependant quelque peu artificielle. Dasgupta et Heal concluent d'ailleurs qu'elle est impraticable pour traduire le principe de juste épargne de Rawls dans la mesure où derrière le voile de l'ignorance, il n'existe aucun moyen de choisir des probabilités subjectives.

¹⁶ Dans le modèle étudié par Claude Henry (1997), chaque génération choisit de modifier ou non le rapport entre capital naturel et capital artificiel par rapport à ce qu'elle a hérité. Avec des paramètres raisonnables pour la fonction d'utilité des agents (qui dépend au départ de la quantité consommée d'un bien artificiel produit par le capital artificiel et de la quantité de capital naturel préservé), la trajectoire optimale au sens du critère du « mini-max » est stationnaire. Si par contre l'utilité de la génération n est autorisée à dépendre de celle de la génération $n+1$, alors il existe des suites optimales pour le critère du « mini-max » qui présentent des niveaux d'utilité croissants.

Dasgupta (1974) montre au contraire avec un modèle de croissance plus simple que même en introduisant une fonction d'utilité de la forme (5.36), la trajectoire optimale au sens du critère du « mini-max » est une trajectoire stationnaire ou incohérente dynamiquement. La différence entre les deux approches nous semble cependant provenir principalement du fait que Dasgupta limite le « degré de désintéressement » de chaque génération. Or des trajectoires optimales croissantes n'apparaissent dans le modèle de Claude Henry que pour des valeurs élevées de ce paramètre qui excèdent à première vue les limites fixées par Dasgupta.

une classe de critères dits soutenables qui se présentent comme la somme pondérée d'un critère actualisé et d'un critère de type limite qui prend en compte les utilités à l'infini.

Comme pour le théorème de Koopmans, nous nous proposons d'examiner en détail les hypothèses et les conclusions du théorème de Chichilnisky avant de nous tourner vers les conséquences de l'emploi d'un tel critère dans un modèle de croissance.

2.2.1. Le théorème de représentation de Chichilnisky

a) Axiomes

La démarche employée par Chichilnisky est identique à celle de Koopmans : il s'agit de déterminer l'ensemble des fonctions d'utilité intertemporelles vérifiant un jeu d'axiomes élémentaires. Pour décrire ces axiomes, nous nous donnons avec Chichilnisky une fonction d'utilité à chaque période u de classe C^1 croissante et bornée. Nous pouvons supposer sans perte de généralité que u est bornée entre 0 et 1. Si x est un programme de consommation donné, le problème de Chichilnisky est de trouver les fonctions d'utilité intertemporelles $U(u(x_1), u(x_2), \dots)$ vérifiant les trois axiomes suivants¹⁷ :

Axiome C1 (sensitivité et complétude) : U est une fonction continue de $\prod_{i=1}^{\infty} [0,1]$ dans $\mathbf{R}^+$ telle que si α et α' sont deux suites de niveaux d'utilité telles que pour toute période i $\alpha_i \geq \alpha'_i$ et pour au moins une période $\alpha_i > \alpha'_i$, alors $U(\alpha) > U(\alpha')$.

Axiome C2 (non-dictature du présent) : La proposition suivante est fausse :

Pour toutes les suites d'utilité α et α' ,

$$U(\alpha) > U(\alpha') \Leftrightarrow \exists A \in \mathbf{N} / \forall \beta, \beta' \forall B > A, U(\alpha_1, \dots, \alpha_{B-1}, \beta_B, \beta_{B+1}, \dots) > U(\alpha'_1, \dots, \alpha'_{B-1}, \beta'_B, \beta'_{B+1}, \dots).$$

Axiome C3 (non-dictature du futur) : La proposition suivante est fausse :

Pour toutes les suites d'utilité α et α' ,

$$U(\alpha) > U(\alpha') \Leftrightarrow \exists A \in \mathbf{N} / \forall \beta, \beta' \forall B > A, U(\beta_1, \beta_2, \dots, \beta_{B-1}, \alpha_B, \alpha_{B+1}, \dots) < U(\beta'_1, \beta'_2, \dots, \beta'_{B-1}, \alpha'_B, \alpha'_{B+1}, \dots).$$

Malgré son apparente simplicité, le premier axiome est d'importance. Il impose en effet que la fonction d'utilité intertemporelle soit à valeur dans $\mathbf{R}^+$, et constitue donc à nouveau une restriction très forte sur la forme du critère d'utilité. En outre, le critère de sensibilité (forte) imposé à la fonction U implique que U doive dépendre explicitement de chacun des niveaux d'utilité.

L'axiome de non dictature du présent mérite quelques éclaircissements. Il y a « dictature du présent » si le classement de toutes les suites de niveaux d'utilité ne dépend que de leurs premiers termes, c'est-à-dire si le classement de toutes les suites de niveaux d'utilité reste inchangé par modification des termes à partir d'une date finie donnée. Pour éviter la dictature du présent, il suffit donc qu'il existe deux suites de niveaux d'utilité telles que pour toute date donnée suffisamment lointaine, il soit possible de modifier le classement de ces deux suites en changeant uniquement les termes situés au-delà de cette date. Le critère de Koopmans ne vérifie pas ce critère capital. L'axiome de non dictature du futur est le symétrique de précédent.

¹⁷ Nous reprenons les notations de la section 1.1.1. Nous définirons par ailleurs U directement sur les suites de niveau d'utilité que nous noterons $\alpha = (\alpha_1, \alpha_2, \dots)$

b) Théorème

Théorème 5.3 (Chichilnisky, 1996) : Si la fonction d'utilité intertemporelle U vérifie les axiomes C1, C2 et C3, elle est alors de la forme :

$$U(\alpha) = \beta \cdot \sum_{t=1}^{\infty} a_t \cdot \alpha_t + (1-\beta) \cdot \phi(\alpha) \quad (5.37)$$

Avec a_t une suite à termes strictement positifs telle que $a_1=1$ et dont la série converge et ϕ un critère limite de type $\limsup(\alpha_t)$ ¹⁸ et $0 < \beta < 1$.

Le théorème 5.3 nous indique que les fonctions d'utilité intertemporelles vérifiant sensibilité, complétude, non-dictature du présent et non-dictature du futur s'écrivent comme la somme pondérée entre un critère classique (avec cependant des facteurs d'actualisation non nécessairement exponentiellement décroissants) et un critère de type limite, qui rend compte du comportement asymptotique de la suite des niveaux d'utilité.

Si la preuve formelle du théorème est complexe (nous renvoyons le lecteur au papier original de Chichilnisky pour la démonstration complète¹⁹), nous pouvons avoir une idée de l'intuition qui la guide. La combinaison des axiomes de non-dictature du présent et de non-dictature du futur exclue en effet à la fois le critère actualisé et les critères se préoccupant uniquement du comportement asymptotique des suites des niveaux d'utilité. Par contre, toute combinaison linéaire de ces deux types de fonctions présente l'intérêt de vérifier à la fois les deux axiomes de non-dictature. En effet, ni les niveaux d'utilité des premières périodes, ni les niveaux d'utilité à très long terme ne sont négligés. L'axiome C1 enfin impose que la série des poids a_t converge (complétude) et qu'aucun des poids ne soit nul (sensibilité).

L'écart entre l'approche de Chichilnisky et celle de Koopmans provient essentiellement du remplacement de l'axiome de stationnarité (K4) par l'axiome de non-dictature du présent (C1). Il est tout d'abord immédiat que l'axiome de non-dictature du présent est incompatible avec les axiomes K1 à K5 et K3' retenus par Koopmans. Mais, plus intéressant, la propriété « inverse » est vraie elle aussi. L'axiome de stationnarité K4 n'est pas compatible avec les axiomes C1 à C3 de Chichilnisky : les fonctions d'utilité intertemporelles obtenues au moyen du théorème 5.3 ne vérifient donc pas la propriété de stationnarité.

Pour s'en convaincre, examinons un petit exemple qui permet de comparer le comportement des deux critères face à des choix analogues mais décalés dans le temps. La société se trouve placée devant un choix entre deux programmes de croissance. Dans le premier, l'utilité de la consommation vaut 1 à la première période, puis 0 ensuite à l'infini (5.38). Dans le second, l'utilité reste nulle pendant T périodes avant de valoir 1 à partir de la période $T+1$ en pendant l'éternité (5.39).

$$\alpha_1 = (1, 0, 0, 0, 0, \dots) \text{ où l'utilité est nulle sauf à la première période} \quad (5.38)$$

$$\alpha_2 = (0, 0, 0, \dots, 0, 1, 1, 1, \dots) \text{ où l'utilité vaut 1 à partir de la période } T \quad (5.39)$$

Nous supposons en second lieu que la même société se trouve placée devant le choix entre deux programmes identiques à (5.38) et à (5.39), mais décalés de $N-1$ périodes dans le temps. Précisément, dans (5.40), l'utilité est nulle sauf à la période N , alors que dans (5.41), l'utilité est nulle jusqu'à la période $T+N-1$, mais vaut 1 ensuite.

¹⁸ En toute généralité, le théorème impose que ϕ soit une mesure additive « essentiellement finie » (Chichilnisky, 1996).

¹⁹ Cependant, la preuve donnée par Chichilnisky (1996) pourra décevoir en ce sens qu'elle consiste essentiellement à montrer que les hypothèses retenues sont bien cohérentes avec un théorème de décomposition plus général donné par Yosida et Hewitt (in Yosida K. [1974] "*Functional analysis*" (4^{ème} édition), Springer Verlag, Berlin).

$$\alpha_{1N} = (0, \dots, 0, 1, 0, 0, 0, 0, \dots) \text{ où l'utilité est nulle sauf à la } N^{\text{ième}} \text{ période} \quad (5.40)$$

$$\alpha_{2N} = (0, \dots, 0, 0, 0, 0, \dots, 0, 1, 1, 1, 1, \dots) \text{ où l'utilité vaut 1 à partir de la période } T+N \quad (5.41)$$

Le lecteur vérifiera sans peine qu'avec un critère actualisé (paramètre $\delta > 0$), la hiérarchie entre α_1 et α_2 est conservée à l'identique entre α_{1N} et α_{2N} quelle que soit la valeur de N . Il s'agit là d'une conséquence directe l'hypothèse de stationnarité. Cette propriété de stationnarité n'est par contre plus vérifiée par le critère de Chichilnisky. Supposons que le critère « limite » ϕ soit donné comme la limite inférieure de la suite des niveaux d'utilité, et choisissons $\beta = 0,75$. Les utilités intertemporelles associées à α_1 et à α_2 par le critère de Chichilnisky (5.37) sont alors données par :

$$U(\alpha_1) = 0,75, \quad U(\alpha_2) = 0,75 \cdot \sum_{t=T}^{\infty} a_t + 0,25 \quad (5.42)$$

En prenant T suffisamment grand, nous pouvons toujours obtenir $U(\alpha_1) > U(\alpha_2)$. Examinons maintenant les utilités intertemporelles données par le critère de Chichilnisky aux programmes α_{1N} et à α_{2N} . Nous obtenons directement

$$U(\alpha_{1N}) = 0,75 \cdot a_N, \quad U(\alpha_{2N}) = 0,75 \cdot \sum_{T+N}^{\infty} a_t + 0,25 \quad (5.43)$$

Puisque la série des poids a_t tend vers 0, $U(\alpha_{1N})$ tend vers 0, alors que $U(\alpha_{2N})$ reste supérieur à 0,25. De fait, si le décalage temporel est assez grand (i.e. si N est assez grand), alors le choix entre ces deux programmes de consommation est renversé par le simple passage du temps.

2.2.2. Quel poids pour les générations intermédiaires ?

Examinons maintenant les conséquences de l'utilisation du critère de Chichilnisky dans un modèle de croissance. Pour ce faire, le plus simple consiste à s'inspirer d'un travail d'Andrea Beltratti, Graciela Chichilnisky et Geoffrey Heal. Dans un papier de 1996, ces trois auteurs se donnent en effet pour objet de comparer le rythme optimal d'exploitation d'une ressource renouvelable selon qu'est utilisé un critère actualisé classique ou le critère de Chichilnisky. Le problème d'optimisation qu'ils considèrent est le suivant :

$$\text{Max } W(u(c_t, s_t)) \quad \text{Critère de maximisation} \quad (5.44)$$

$$\dot{s}_t = r(s_t) - c_t \quad \text{Dynamique de renouvellement de la ressource} \quad (5.45)$$

Où nous avons noté s_t le stock de ressource, r la fonction de renouvellement de ce stock, u la fonction d'utilité à chaque période et W le critère de maximisation (actualisé ou de Chichilnisky). Or ce problème est formellement identique au problème de maximisation (5.15)-(5.18). Il suffit en effet de réinterpréter s_t comme le capital par tête, r comme la productivité nette du capital ϕ et de se placer dans le cas particulier où u ne dépend pas de s_t . Munis de cette grille de lecture, nous pouvons donc « détourner » l'ensemble des résultats de Beltratti *et al.* Précisément, les auteurs en examinent le comportement de leur modèle avec critère actualisé²⁰, puis ils comparent ces résultats à ceux obtenus avec un critère de Chichilnisky. Nous nous intéressons en particulier à cette analyse, qui mobilise un critère de la forme (5.37) avec des poids a_t exponentiellement décroissants à un taux constant et un

²⁰ Nous retrouvons en particulier le fait que le niveau optimal de consommation soutenable à long terme avec un critère utilitariste est inférieur au niveau maximal de consommation soutenable (c^* dans les notations de la première section). Dans le contexte d'une ressource renouvelable, l'optimum utilitariste ($\delta > 0$) conduit à une solution stationnaire produisant plus, mais avec un stock de ressource moins élevé que dans le cas de la « règle d'or verte » (qui serait cependant atteint pour $\delta = 0$).

critère limite ϕ choisi comme la limite de l'utilité de la consommation. Le critère examiné est donc finalement :

$$\text{Max}_{c_t} \beta \cdot \int_0^{\infty} u(c_t) \cdot e^{-\delta t} \cdot dt + (1-\beta) \cdot \lim_{t \rightarrow \infty} u(c_t) \quad (5.46)$$

Dans ce premier cas de figure, Beltratti *et al.* montrent que le problème de maximisation (5.46), (5.16)-(5.18) n'a pas de solution optimale. Pour donner une idée des raisons qui fondent ce résultat, remarquons que les trajectoires répondant aux conditions nécessaires d'optimalité de ce problème (en pointillés sur la figure 5.5), sont des trajectoires débutant par un niveau de consommation c_0 strictement inférieur au niveau $\hat{c}_0$ et consistant ensuite à accumuler du capital jusqu'à k^* avant de « sauter » au niveau de consommation soutenable maximal c^* . Etant donné que deux solutions du système ne peuvent se recouper, nous voyons immédiatement que toute trajectoire partant d'un niveau c_1 plus élevé que c_0 mais toujours strictement inférieur à $\hat{c}_0$ aura une consommation plus élevée que la première. Le problème est qu'à la limite, si c_0 est égal à $\hat{c}_0$, la trajectoire ne tend plus vers (k^*, c^*) , mais vers $(\hat{k}, \hat{c})$.

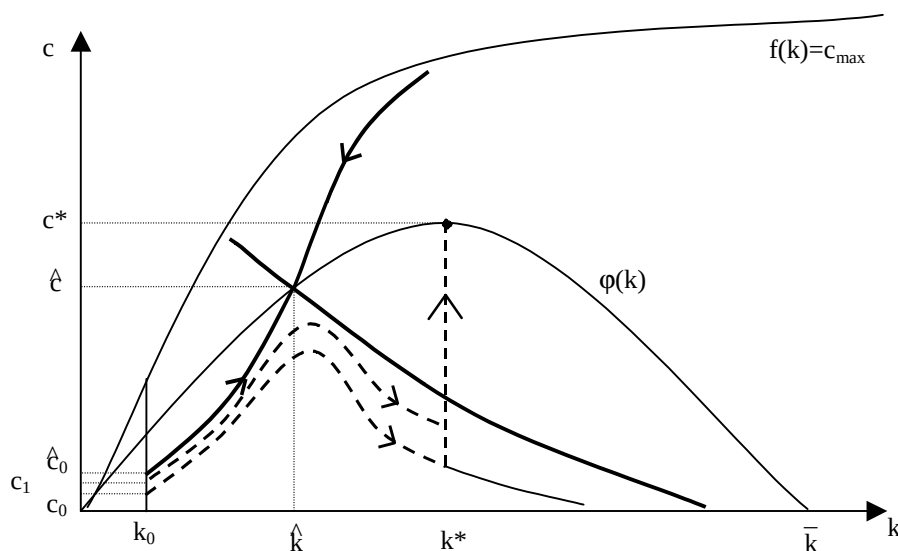


Figure 5.5 : Diagramme de phase du modèle de croissance avec critère de Chichilnisky avec critère exponentiellement décroissant. Les trajectoires en pointillés représentent les solutions des conditions nécessaires d'optimalité du programme de croissance.

En outre, la figure 5.5 nous montre que les trajectoires « quasi optimales » en pointillés commencent par être proches de la trajectoire optimale pour le critère actualisé avant de s'infléchir brutalement pour accumuler le capital nécessaire pour soutenir la consommation c^* . Graphiquement, cette transition est marquée par une baisse de la consommation et par un niveau d'épargne élevé pour accumuler le capital. Cette propriété des solutions « quasi optimales »²¹ est confirmée numériquement par une analyse conduite à l'aide du modèle STARTS. Le modèle est ici identique à celui présenté au chapitre 1, en remplaçant simplement le critère de maximisation actualisé (équation 1.21) par le critère de Chichilnisky (5.46). Le modèle étant calibré sur un nombre fini de périodes, nous remplaçons le critère limite par la moyenne des utilités de la consommation sur les cinq dernières périodes.

²¹ Qui avait déjà été démontrée de manière indépendante, mais dans un autre contexte, par Krass *et al.* (1992).

La figure 5.6 présente la trajectoire optimale d'émissions sans contrainte climatique en fonction de la valeur du paramètre β . Rappelons que dans le modèle STARTS, les émissions sont directement liées à la production, et donc au niveau de capital accumulé. Nous observons clairement deux régimes bien distincts caractérisés par deux cas limites : $\beta=1$ (trait gras) représente les émissions obtenues avec le critère actualisé classique, $\beta=0$ (trait fin) représente au contraire la trajectoire d'émissions obtenue avec le critère « limite ». La courbe en traits gras est nettement au dessus de la courbe en traits fins, ce qui indique que l'accumulation du capital est nettement plus importante dans ce premier cas que dans le second²².

Le plus intéressant est d'examiner ce qui se produit pour des valeurs intermédiaires de β . Dans ce cas, la trajectoire d'émissions commence par suivre la trajectoire « actualisée » avant de passer brutalement, à une date d'autant plus rapprochée que β est petit, à une trajectoire d'émissions « limite ». Nous observons durant la phase de transition des taux d'investissement très élevés et une forte diminution de la consommation. De fait, si les générations futures et les générations présentes sont bien prises en compte par le critère de Chichilnisky, les générations intermédiaires se trouvent particulièrement mal loties : elles doivent en effet subir une phase de transition particulièrement brutale.

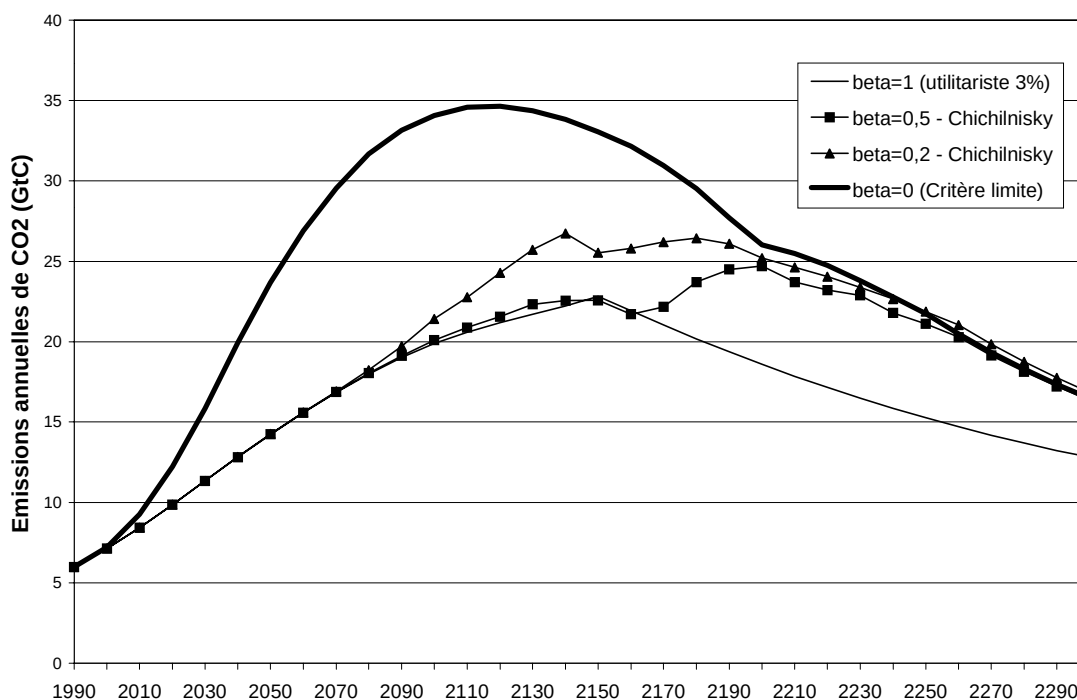


Figure 5.6 : Niveaux d'émissions de CO₂ fossiles (GtC/an) obtenues sans contrainte environnementale selon que le critère de maximisation est actualisé ($\beta=1$, $\delta=3\%$, trait fin), « limite » ($\beta=0$, trait gras) ou de Chichilnisky (ici $\beta=0,2$ ou $\beta=0,5$).

Pour éviter ce résultat peu encourageant, Beltratti *et al.* envisagent alors une seconde forme du critère de Chichilnisky en choisissant cette fois-ci des poids exponentiellement décroissants :

$$\text{Max}_{c_t} \beta \cdot \int_0^{\infty} u(c_t) \cdot e^{-q(t) \cdot t} \cdot dt + (1-\beta) \cdot \lim_{t \rightarrow \infty} u(c_t) \quad \text{avec } \lim_{t \rightarrow \infty} q(t) = 0 \quad (5.47)$$

²² Rappelons ici que dans STARTS, nous postulons que les émissions sont peu à peu découplées du niveau de production. C'est ce qui explique le fait que les émissions de référence décroissent à partir du milieu du siècle prochain.

Dans ce contexte, les auteurs démontrent²³ qu'il existe maintenant un chemin de croissance optimal, et que celui tend vers la consommation maximale soutenable (c^*, k^*). Le point principal est que le chemin de croissance optimal obtenu en maximisant (5.47) est le même que celui qui aurait été obtenu en ne maximisant que la première partie du critère (équation 5.48).

$$\text{Max}_{c_t} \int_0^{\infty} u(c_t) \cdot e^{-q(t) \cdot t} \cdot dt \quad \text{avec } \lim_{t \rightarrow \infty} q(t) = 0 \quad (5.48)$$

Il est possible de donner une explication intuitive de ce résultat. Dans le premier cas de figure, le critère actualisé et le critère limite ne tiraient pas le modèle dans la même direction. Dans ce second cas au contraire, tout se passe « bien » dans la mesure où les deux critères tirent dans le même sens. Nous pouvons conjecturer que ce résultat est général : si les deux termes du critère de Chichilnisky, pris isolément, tendent vers le même point d'équilibre stationnaire, alors il existe un chemin optimal. Si les deux points d'équilibre sont au contraire différents, alors il n'existe pas de chemin optimal, et les trajectoires quasi-optimales présentent une transition brutale entre les deux trajectoires limites. Si cette conjecture est exacte, le paramètre β apparaît comme un objet paradoxal. Soit en effet il a un véritable sens de pondération entre deux critères différents, mais il n'existe pas de trajectoire optimale, soit il existe un chemin de croissance optimal, mais celui-ci aurait été obtenu quelle que soit la valeur du paramètre β ²⁴.

En conclusion, le détour proposé par Chichilnisky est particulièrement fécond. Il permet en effet de conjuguer l'intérêt d'un critère de choix complet avec une prise en compte explicite des intérêts des générations très lointaine. Cette avancée se fait cependant au détriment de l'hypothèse de stationnarité. Elle conduit de plus à introduire un paramètre d'arbitrage entre présent et futur (le paramètre β) dont la valeur est *a priori* susceptible d'influencer largement la décision, et donc de mener à des discussions difficiles. En outre, son introduction dans des modèles de croissance entraîne soit une absence de trajectoire optimale, soit une trajectoire optimale identique à celle qui aurait été obtenue sans pondération entre deux critères. Même si ces éléments demandent à être complétés, ils nous semblent suffisants pour nous détourner pour le moment de l'utilisation du critère de Chichilnisky.

3. « Les gens ne se comportent pas ainsi ! »

Le second angle d'attaque des contempteurs du critère actualisé de Koopmans consiste à relever qu'il ne rend pas bien compte des comportements individuels. Dans une entreprise tout à fait analogue à celle de Maurice Allais (1953) contre le modèle d'espérance de l'utilité en décision sous risques, de nombreux auteurs autant en économie qu'en psychologie soulignent que le comportement des individus placés devant des choix intertemporels ne correspond pas aux prédictions du modèle de Koopmans. Nous revenons dans un premier temps sur ces résultats empiriques avant de décrire le modèle proposé par Loewenstein et Prelec (1992). Nous examinons enfin la pertinence d'une extension de ce critère de choix individuel à la société toute entière.

²³ La problème est compliqué par le fait que le taux d'actualisation est maintenant non constant. Beltratti *et al.* (1996) font appel à la théorie des systèmes d'équations différentielles asymptotiquement autonomes pour le résoudre.

²⁴ Après la valeur d'option et les probabilités subjectives, il s'agirait ici du troisième paramètre « de Favereau » (1991) qui est soit calculable mais inutile, soit au contraire déterminant mais impossible à calculer.

3.1. Critiques de la pertinence des axiomes de Koopmans pour décrire les comportements des agents

3.1.1. Observations de choix intertemporels

Nous avons déjà noté dans ce qui précède que les conséquences du critère actualisé pouvaient sembler assez éloignées de ce que nous dicte l'intuition. L'exemple développé en section 2.2.1 nous indique ainsi que la propriété de stationnarité (axiome K4) est pour le moins discutable. De nombreuses études empiriques, tant en économie qu'en psychologie, nous montrent que ce cas n'est pas isolée : les comportements des individus placés devant des choix intertemporels diffèrent en général notablement des prescriptions du critère de Koopmans. Nous reformulons ci-dessous les principales « anomalies » observées sur la base d'un article de Loewenstein et Prelec (1992)²⁵.

- Effet de distance : Le taux d'actualisation implicite apparaît d'autant plus faible que le gain ou la perte future est éloignée dans le temps. Il s'agit là d'une confirmation empirique de la non stationnarité des choix des individus.
- Effet d'amplitude : Les études empiriques montrent que des montants futurs élevés sont actualisés à un taux plus faible que des montants peu importants.
- Asymétrie perte-gain : Les gains sont en général actualisés à un taux plus élevé que les pertes. Cet écart peut être important au point de générer des taux d'actualisation négatifs pour des pertes (une perte aujourd'hui étant alors préférée à une perte de même grandeur demain).
- Asymétrie ralentissement-accélération : Cette asymétrie est similaire à la précédente, mais joue dans le temps. Le fait de rapprocher un gain d'un intervalle de temps donné est en général nettement moins valorisé que le fait d'éloigner ce gain dans le temps d'un même intervalle de temps.

3.1.2. Conséquences rhétoriques sur les discours relatifs à l'effet de serre

Une première conséquence des observations résumées au-dessus est présenter un choix en termes de pertes ou de gains, ou choisir la référence de telle sorte que les montants en jeu soient faibles ou élevés, a *a priori* un impact fort sur le taux d'actualisation implicite que les agents utilisent, et donc sur leurs choix finals. Plusieurs expériences confirment cette prédiction (Loewenstein et Prelec, 1992).

S'il s'agissait uniquement de retrouver un « résultat » général déjà connu des Sophistes de l'antiquité, tout ceci ne serait que de peu d'intérêt. Mais il est par contre utile d'examiner en détail la nature de ces mécanismes dans le cas du changement climatique. Sur la base des effets observés au-dessus, Mohr (1995) propose une série de recommandations de nature rhétorique à destination des partisans du *wait and see* en matière climatique (que nous nommerons « conservateurs ») et de ceux qui militent au contraire pour des actions rapides face au changement climatique (les « verts »).

Pour utiliser l'asymétrie entre gains et pertes futures, les conservateurs ont intérêt à présenter le problème en termes de coûts aujourd'hui et de gains demain, alors que les verts devraient quant à eux insister sur les coûts futurs de ne rien faire aujourd'hui. Autrement dit, les conservateurs ont intérêt à se référer à un scénario de référence de type *business as usual*, alors que les verts doivent au contraire mettre en valeur les pertes liées au fait que nous soyons écartés d'un scénario sans aucune pollution. En outre, les seconds devraient s'employer à amplifier les pertes ou gains futurs alors que les premiers devraient au contraire les minimiser pour jouer sur l'effet d'amplitude. Une juste exploitation de

²⁵ Pour plus de précision, nous renvoyons le lecteur à la bibliographie de Loewenstein et Thaler (1992), ainsi qu'à Loewenstein et Thaler (1989) pour une analyse plus littéraire.

l'effet de distance commande enfin aux premiers d'insister le plus possible sur les éléments de long terme alors que les seconds devraient au contraire se concentrer sur le court terme.

Cette grille de lecture est bien évidemment trop simple, en particulier parce qu'elle ne distingue pas les effets liés au long terme de ceux qui relèvent de l'incertitude. En second lieu, l'usage adéquat de mots comme « marché », « taxe », « permis de polluer » ou, pire encore, « recommandation américaine » semble aujourd'hui une stratégie rhétorique nettement plus payante que tout habillage subtile des pertes et des gains futurs. La typologie de Mohr constitue néanmoins une piste intéressante pour décrypter les différents discours sur l'arbitrage court terme / long terme.

3.1.3. Actualisation hyperbolique

Revenons maintenant aux observations empiriques sur les choix des agents. Loewenstein et Prelec (1992) en tirent une fonction de bien-être sociale intertemporelle se présentant toujours comme une somme actualisée des niveaux d'utilité de chaque génération, mais avec des facteurs d'actualisation qui ne sont plus exponentiellement décroissants. Formellement, ce critère s'écrit comme

$$U(x) = \sum_{t=1}^{\infty} a_t \cdot u(x_t) \quad (5.49)$$

$$a_t = (1 + \alpha t)^{-\frac{\beta}{\alpha}} \quad \alpha > 0, \beta > 0 \quad \text{Facteurs d'actualisation hyperboliques} \quad (5.50)$$

Lorsque α tend vers 0, les poids a_t tendent vers les poids exponentiellement décroissants classiques. Cropper *et al.* (1994) montrent que ce modèle rend compte très correctement d'observations empiriques sur les choix en matière d'actualisation²⁶. Le critère (5.49)-(5.50) étant cependant difficile à manipuler analytiquement, Cropper et Laibson (1999), à la suite de Phelps et Pollak (1968), lui préfèrent un critère « quasi-hyperbolique » plus simple à manipuler qui présente aussi comme une somme pondérée des utilités de la consommation, mais avec des poids définis comme :

$$a_0 = 1, a_t = \frac{\beta}{(1 + \delta)^t} \quad \forall t \geq 1, 0 < \beta < 1, 0 < \delta \quad \text{Facteurs d'actualisation quasi-hyperboliques} \quad (5.51)$$

3.2. L'actualisation hyperbolique comme critère de décision de la société ?

Admettons que le critère « quasi hyperbolique » constitue une représentation correcte des préférences des agents, ou du moins une représentation plus correcte de ces préférences que le critère actualisé de Koopmans. Toute la question est maintenant de savoir dans quelle mesure la société toute entière devrait s'inspirer de ce critère pour effectuer ses choix. La construction d'un critère de choix intertemporel sur la base de (5.49)-(5.51) bute en premier lieu sur une question d'agrégation des préférences individuelles. Les axiomes de Koopmans et de Chichilnisky peuvent en effet être compris comme des propriétés générales d'une règle de décision abstraite sur laquelle il serait possible de se coordonner. Dans le cas qui nous occupe ici, le fondement des préférences est individuel : il faut donc trouver les moyens d'un accord sur le degré de prise en compte des générations futures (β) ou le taux d'actualisation de l'utilité subséquent (δ). Nous faisons ici l'hypothèse que ce problème est résolu, et

²⁶ Selon Henderson et Bateman (1995), la formule de l'actualisation hyperbolique permet en outre de mieux rendre compte des taux d'actualisation publics implicitement utilisés par les administrations, en général d'autant plus faibles que les politiques considérées sont à long terme. Cet argument nous semble cependant contestable dans la mesure où (i) les données empiriques sont nettement plus rares, (ii) le modèle est nettement moins bien ajusté aux données et (iii) l'exemple principal retenu par les auteurs, à savoir l'exploitation forestière, semble simplement indiquer que la forêt est implicitement valorisée de manière très importante par les différentes générations.

nous nous attachons aux conséquences de l'emploi d'un critère tel que (5.49)-(5.51) pour la décision sociale.

Partons d'une constatation simple : la caractéristique la plus évidente du critère de décision hyperbolique ou quasi-hyperbolique est qu'il induit une incohérence dynamique des choix, en ce sens qu'un programme considéré comme optimal à la première période peut ne plus l'être à une période suivante. Nous illustrons ce mécanisme en reprenant le problème de choix présenté à la section 2.2.1. Rappelons que nous avons quatre types de programmes possibles, les programmes α_{1N} et α_{2N} étant simplement construits par décalage de α_1 et α_2 de N périodes vers le futur.

$$\alpha_1 = (1, 0, 0, 0, 0, \dots) \text{ où l'utilité est nulle sauf à la première période} \quad (5.52)$$

$$\alpha_2 = (0, 0, 0, \dots, 0, 1/10, 1/10, \dots) \text{ où l'utilité vaut } 1/10 \text{ à partir de la période } T \quad (5.53)$$

$$\alpha_{1N} = (0, \dots, 0, 1, 0, 0, 0, 0, \dots) \text{ où l'utilité est nulle sauf à la } N^{\text{ième}} \text{ période} \quad (5.54)$$

$$\alpha_{2N} = (0, \dots, 0, 0, 0, 0, \dots, 0, 1/10, 1/10, \dots) \text{ où l'utilité vaut } 1/10 \text{ à partir de la période } T+N \quad (5.55)$$

Si nous choisissons ici $\beta=0,5$, $\delta=0,03$ et $T=30$ ans, nous observons que tant que N est supérieur ou égal à 12, le choix optimal au sens du critère quasi hyperbolique consiste à préférer α_{2N} à α_{1N} . Mais dès que N devient inférieur à ce nombre, le choix s'inverse et le projet α_{1N} devient préféré à α_{2N} . Autrement dit, les anticipations que nous pouvons formuler à l'avance seront démenties par les faits. Plus grave, des programmes que nous mettons en œuvre peuvent se révéler *in fine* moins efficaces que d'autres du fait du simple passage du temps. Bien entendu, si l'agent représentatif connaît sa propre fonction d'utilité intertemporelle et anticipe que celle de ses successeurs aura la même forme, il peut utiliser cette information pour modifier son comportement.

Nous nous trouvons alors typiquement dans le cadre d'un jeu entre générations dont les intérêts sont divergents, et le cadre naturel d'une telle analyse est celui de la théorie des jeux (Arrow, 1999). Dans le cadre d'un modèle de croissance à productivité du capital constante, Phelps et Pollak (1968) ont examiné en détail les trajectoires de croissance qui pouvaient émerger d'une telle configuration où chaque génération se préoccupe des suivantes, mais sans pouvoir en contraindre les décisions. Deux résultats principaux peuvent être tirés de leur analyse :

- En premier lieu, la génération présente souhaiterait au premier rang que toutes les générations futures adoptent un taux d'épargne σ^* supérieur au taux σ_0^* qu'elle souhaiterait adopter elle-même. Cette différence est naturellement due à la présence du facteur β qui introduit une asymétrie de traitement entre la génération présente et l'ensemble des générations futures dans la fonction d'utilité intertemporelle.
- Le jeu entre générations à un unique équilibre de Nash, au sens où si une génération s'attend à ce que toutes les suivantes choisissent le taux d'épargne $\hat{\sigma}$, alors il est dans son intérêt de choisir elle aussi ce taux $\hat{\sigma}$. Cet équilibre de Nash n'est en général pas Pareto-Optimal, en ce sens qu'il existe un taux d'épargne $\bar{\sigma} > \hat{\sigma}$ tel que si toutes les générations l'adoptaient, alors toutes verraient leur utilité augmenter par rapport à l'équilibre de Nash. L'équilibre coopératif est cependant instable, chaque génération ayant individuellement intérêt à investir moins que $\bar{\sigma}$.

Cropper et Laibson (1999) tirent argument de cet écart entre le résultat de l'équilibre de Nash et la trajectoire de croissance Pareto optimale pour proposer que les Etats appuient l'investissement, afin de faire en sorte que le taux d'épargne soit le plus proche possible de $\bar{\sigma}$. Cet argument s'appuie cependant sur l'hypothèse selon laquelle la société fait effectivement ses choix en utilisant un critère de décision quasi-hyperbolique. Or le travail de Phelps et Pollak montre aussi *a contrario* qu'une telle hypothèse n'est pas vérifiable sur le plan macroéconomique.

Supposons en effet un observateur extérieur qui observerait une trajectoire de croissance caractérisée par des taux d'épargne constant pour une économie comme celle donnée dans la première section de ce chapitre. Cet observateur ne serait pas en mesure de déterminer sur la base de cette seule information le caractère Pareto efficace ou non de cette trajectoire. En effet, s'il fait l'hypothèse que les choix intertemporels sont effectués au moyen d'un critère actualisé à la Koopmans, alors le taux d'épargne qu'il observe traduit le fait que l'économie est sur une trajectoire de croissance stationnaire optimale. S'il suppose au contraire que chaque génération a des préférences quasi hyperboliques, le taux d'épargne observé traduit alors un équilibre de Pareto entre générations.

En termes de politiques publiques, la recommandation d'un soutien aux investissements n'est donc fondée que dans la mesure où il est possible de montrer que nous sommes effectivement en présence d'un équilibre de Nash dans un jeu entre générations. Or il n'est empiriquement pas évident de démontrer que les décideurs publics s'appuient sur des préférences hyperboliques²⁷. De plus, accepter l'idée de l'équilibre de Nash suppose que nous n'investirions pas plus parce que nous ne sommes pas assurés que nos descendants eux-mêmes n'investiront pas plus, ce qui demande à être vérifié²⁸. Enfin, comme nous l'avons évoqué au début de cette discussion, choisir des préférences hyperboliques suppose d'accepter sciemment des incohérences dynamiques : comme le notent Beltratti *et al.*, les conséquences d'un tel choix demandent à être examinées de plus près.

Pour l'heure, nous n'estimons pas disposer d'arguments suffisant pour utiliser une actualisation « hyperbolique ». Et ce point est renforcé par le fait que les travaux de Phelps et Pollak soulignent *a contrario* l'un des intérêts du critère de Koopmans. Nous observons en effet que si $\beta=1$, c'est-à-dire si le critère hyperbolique se confond avec le critère actualisé de Koopmans, alors $\bar{\sigma}=\delta$: l'équilibre de Nash est Pareto-optimal. Ce résultat justifie *a posteriori* le fait que nous ayons employé indifféremment la métaphore du planificateur immortel ou celle d'un jeu entre générations pour le décrire.

Conclusion : vers une réinterprétation de la « préférence pure pour le présent »

Ce chapitre nous aura donc permis de montrer qu'il existe des arguments très forts pour utiliser le critère actualisé avec un taux δ strictement positif comme critère de choix intertemporel. En amont, ce critère vérifie en effet des axiomes particulièrement importants, en particulier la complétude et la stationnarité. En aval, il génère des trajectoires de croissance raisonnables dans des modèles de croissance simples dès lors que la valeur du taux d'actualisation de l'utilité n'est pas trop faible. Si ce taux est trop bas, les taux d'épargne optimaux se révèlent élevés et imposent aux générations présentes et futures des sacrifices que nous pouvons pour le moins qualifier de discutables. L'utilisation de ce critère rencontre néanmoins deux critiques :

- La critique « psychologue » du critère actualisé présente un contenu empirique très fort, mais se heurte au problème de la cohérence dynamique des choix, qui nous semble une propriété indispensable pour un critère public de décision intertemporel. Reste par contre ouverte la question de la cohérence entre des préférences « hyperboliques » privées et un critère de décision public actualisé.

²⁷ La forêt citée en exemple précédemment d'ailleurs d'un domaine privilégié dans lequel il serait possible de tester le réalisme des modèles de décision actualisé et hyperbolique pour rendre compte des décisions effectivement effectuées par les forestiers.

²⁸ Robert Solow se montre sceptique sur ce point : « *Leaving aside all technical points, I have to say this does not feel anything like the way policy is talked about or could be talked about in a democracy, especially since any current generation is notoriously bad at guessing what future generations will want or do.* » (Solow, 1999).

- Les différentes critiques « éthiques » selon lesquelles il ne serait pas équitable d'affecter des poids différents aux utilités des différentes générations conduisent quant à elles à des solutions (« maxi-min » ou Chichilnisky) qui, si elles vérifient aussi des jeux d'axiomes raisonnables, ont des conséquences pour le moins discutables lorsqu'elles sont employées dans des modèles de croissance.

Plus globalement, nous pouvons nous interroger sur les raisons pour lesquelles les générations futures devraient être gratifiées d'un poids au moins aussi élevé que les générations présentes dans la fonction de bien-être intertemporelle. Notons bien qu'il ne s'agit pas ici de principes que nous tenons comme des impératifs catégoriques non discutables (respect de la dignité ou de la vie humaine par exemple) : il n'existe pas de droit imprescriptible des générations futures à disposer d'un poids plus ou moins élevé dans une quelconque fonction d'utilité sociale intertemporelle (Godard, 1999). De fait, nous sommes fondés à examiner à la fois les principes logiques sur lesquels s'appuient en amont ces critères et quels sont les conséquences pratiques de leur utilisation en aval dans des problèmes de décision concrets²⁹. Comme le dit Tjalling Koopmans (1965) « *The underlying idea [...] is that the problem of optimal growth is too complicated, or at least too unfamiliar, for one to feel comfortably making an entirely a priori choice of optimal criterion before one knows the implications of alternative choices.* » (p.226).

Si l'on accepte ce point de départ, il nous devient possible de revenir sur la signification du taux d'actualisation de l'utilité δ . Dans la théorie de Koopmans, introduire un tel paramètre strictement positif traduit mathématiquement l'hypothèse sous jacente de complétude des choix. En tant que paramètre, δ pas d'autre signification. Par contre, le fait de donner à δ une valeur de l'ordre de 3% véhicule un choix normatif fort : nous considérons ce faisant qu'il est nécessaire de préserver des taux d'épargne voisins de leurs valeurs actuelles. De fait, la dénomination de « préférence pure pour le présent » nous semble inappropriée. Elle suggère en effet l'idée que le paramètre δ est introduit pour privilégier la génération présente au détriment des autres. Or tel n'est pas le cas, et δ se présente plutôt comme une « préférence pour la complétude du critère ». Par contre, lui donner une valeur voisine de $x\%$ ou $y\%$ introduit un jugement de valeur sur les taux d'épargne acceptables à court terme par la génération présente. En ce sens, il est possible de dire que la valeur de δ mesure la « préférence pour le non sacrifice du présent ».

En définitive, la valeur du « taux de préférence pure pour le présent » traduit effectivement un choix qui relève de l'arbitrage entre court terme et long terme : il s'agit du choix d'un taux d'épargne plus ou moins élevé pour la première génération. Par conséquent, ce choix ne saurait résumer l'ensemble de la discussion sur l'arbitrage entre court terme et long terme. Ainsi, le fait que des générations futures puissent ou non subir des « pics » de coûts ne peut être contrôlé par le biais du « taux de préférence pure pour le présent ». Il nous faut donc maintenant poser de manière plus large la question de l'arbitrage court terme / long terme. C'est ce à quoi nous nous employons dans le prochain chapitre.

²⁹ L'analyse économique joue ici le rôle d'un outil de mise en cohérence entre les critères mathématiques, les postulats sous-jacents et les conséquences des critères de décision. L'usage du langage mathématique devient ici naturel dans la mesure où il est précisément construit comme un outil capable de dire les cohérences entre diverses propositions. Son usage n'est cependant justifiée que s'il permet d'aboutir à la mise en relation de propositions simples et sur lesquels il est facile de porter un jugement.

Chapitre 6 De l'équité intergénérationnelle à la nature de l'héritage

Nous nous trouvons maintenant avec une vision plus modeste du taux d'actualisation. Tant les expériences numériques que nous avons conduites dans la première partie que le retour sur les fondements théoriques auquel nous avons procédé dans les deux derniers chapitres nous montrent que ce paramètre ne saurait suffire à résumer à lui tout seul l'arbitrage entre court terme et long terme dans les politiques climatiques. Nous sommes donc ramenés à notre question de départ : comment penser la distribution temporelle des coûts des politiques climatiques ?

Cette question se révèle d'autant plus difficile que les deux chapitres précédents nous conduisent à nous interroger sur le sens même d'une telle distribution. En effet, du fait de l'incertitude qui pèse sur les termes du problème climatique (dommages et coûts d'abattement), il n'y a plus une distribution temporelle des coûts mais, comme nous l'avons vu au chapitre 4, autant de distributions des efforts qu'il y a d'état du monde possible dans le futur. Plus encore, le modèle de Phelps et Pollak (1968) que nous avons présenté au chapitre 5 rappelle un fait essentiel que la métaphore du planificateur éternel contribue à masquer : toute politique à long terme est essentiellement un pari sur le comportement des générations à venir. Or s'il ne peut y avoir de conflit entre moi et moi, il se peut tout à fait qu'il y ait divergence de points de vue entre moi et mes enfants¹.

Pourtant, le problème climatique, entre beaucoup d'autres, nous rappelle que nous ne pouvons pas ne pas avoir d'influence sur nos descendants. Si tout était réversible, la génération future n'aurait qu'à réorienter les politiques environnementales conformément à ses préférences. Mais dans un monde dans lequel les décisions prises à la date t modifient l'espace des choix à la date $t+n$, l'arbitrage entre court terme et long terme ne peut être évité. Toute la question est de savoir comment gérer cette influence, ce qui soulève une question morale à fortes implications économiques :

- Sur le plan moral tout d'abord, de quel droit la génération présente imposerait ses préférences aux générations futures ? Sommes-nous légitimes à engager nos descendants dans des politiques climatiques irréversibles, qu'elles soient environnementalistes ou non ? Devons-nous au contraire leur laisser le plus de marges de manœuvre possible ?
- Sur le plan économique ensuite, et au-delà du simple constat du fait que le temps s'écoule de manière irréversible, il convient de s'interroger sur les éléments qui conditionnent la plus ou moins grande rigidité de ce que nous transmettons à nos descendants, sur la mesure de cette flexibilité, ainsi que sur les possibilités que nous avons aujourd'hui pour en transmettre plus ou moins.

Pour ce qui est de la première question, nous serions tentés de répondre par la négative afin de ne pas préempter la liberté de nos descendants, suivant en cela Arrow *et al.* (1996b)². Mais il nous faut reconnaître immédiatement que cette position présente des limites évidentes : l'histoire est en grande partie faite de constructions bâties par leurs architectes de manière volontairement irréversible. L'édit de Villers-Cotteray qui signe la prééminence du français, ou la construction européenne voulue au sortir de la seconde guerre mondiale pour éviter qu'une autre guerre n'oppose encore la France et l'Allemagne en sont de bons exemples. Plus près de nous, ne fallait-il pas « créer l'irréversible » en mettant en œuvre le programme électronucléaire français dans les années 1970 (Hourcade, 1990a) ?

¹ La « solidarité dynastique » que nous avons examinée au chapitre 4 en constitue un bon exemple.

² « [The objective of the first step of the decision sequence is] to put the society as far as possible in the position to postpone technological or institutional "lock-in" » (Arrow *et al.*, 1996b, p.71). Le lecteur pourra aussi se référer au chapitre 2 pour une discussion de la notion de « décision séquentielle ».

Nous touchons ici d'un débat philosophique qui dépasse largement le cadre de cette thèse. Fidèles à la ligne de conduite que nous avons adoptée dès le début de cette thèse, nous considérons ici que l'économiste peut modestement contribuer à ce débat en révélant la nature et le coût de la flexibilité ou de la rigidité pour notre génération³. Nous nous y attachons maintenant.

Pour introduire cette discussion, il est utile de présenter ici un résultat obtenu par Richard Tol. Dans un article publié en 1998, Tol considère un monde dans lequel la génération actuelle souhaite faire en sorte que la concentration atmosphérique en CO₂ ne dépasse jamais un plafond relativement faible. Ce plafond peut être interprété comme le « seuil de danger » défini par la Convention Cadre sur le Changement Climatique. Les générations suivantes sont par contre susceptibles de changer d'avis, et de fonder leurs politiques climatiques sur une analyse coûts avantages. L'hypothèse centrale du travail de Tol est que cette analyse coûts avantages aboutirait à une moindre réduction des émissions, c'est-à-dire à laisser filer les concentrations à un niveau supérieur au plafond retenu par la première génération. Cette hypothèse est parfaitement réaliste si nous considérons par exemple que l'analyse coûts avantages future sera fondée sur des valeurs moyennes des dommages du changement climatique alors que le plafond choisi aujourd'hui prend en compte la possibilité d'une « surprise » climatique. Tol se donne enfin une loi de probabilités pour qu'une génération donnée bascule d'un comportement à l'autre, et considère les deux cas suivants :

- Dans le premier, la génération actuelle ignore que les générations à venir sont susceptibles de changer d'avis. La politique optimale d'abattement à court terme se caractérise alors principalement par une trajectoire d'abattement relativement « douce » complétée par une faible quantité de recherche et développement. Dans ce contexte, le pourcentage chance réel, compte tenu de la volatilité des préférences, de parvenir finalement à la stabilisation de la concentration au niveau souhaité par la première génération n'est que de 13%.
- Dans le second, chaque génération internalise le fait que les générations à venir sont susceptibles de changer d'avis. Si elle est cohérente avec son propre objectif, la génération présente doit adopter une politique climatique plus agressive, tout en sachant qu'elle n'aura jamais la certitude que le plafond qu'elle préconise sera atteint. Pour s'assurer une probabilité finale de 40%, Tol calcule que la génération présente doit augmenter ses abattements (de 2% à 6% environ des émissions de référence), mais surtout multiplier par un facteur 10 les investissements en R&D afin « d'inciter » ainsi les générations futures à abattre davantage en modifiant les termes de leur analyse coûts avantages. Les coûts sont alors multipliés par 6.

Ce travail met en lumière deux étapes de l'analyse économique de la flexibilité. La première consiste à décrire les éléments qui permettent à une génération d'influencer celles qui lui succèdent. Dans le modèle de Tol, nous constatons que ce n'est pas tant la quantité d'émissions que notre génération émet dans l'atmosphère que les potentiels techniques qu'elle transmet qui comptent pour influencer la décision de la génération future⁴. L'analyse de la flexibilité suppose donc d'aller au-delà des grandeurs agrégées, niveau de richesse ou quantité d'émissions, qui caractérisent ce que nous laissons à nos descendants pour entrer en détail dans la nature du système technique et institutionnel que nous transmettons

Mais la flexibilité n'est pas désirable en soi. Elle ne prend de l'importance que si nos descendants sont susceptibles d'avoir à en faire usage. Autrement dit, les inerties du système technico-économique ne sont dangereuses que dans la mesure où elles sont rapportées à l'inertie et aux incertitudes sur le

³ Nous retrouvons ici la question que nous avons posée au début du chapitre 2 en discutant la notion de « décision séquentielle » introduite par Arrow *et al.* (1996b) : s'agit-il de rechercher la flexibilité à tout prix, ou au contraire de la mettre en regard d'autres éléments comme par exemple le coût d'une politique qui viserait à préserver la flexibilité ?

⁴ Ce constat peut être généralisé : l'accumulation du CO₂ dans l'atmosphère étant un processus cumulatif, l'impact de notre génération sur la concentration totale en 2100 est faible. En effet, dans les principaux scénarios de référence à long terme (cf. chapitre 7), les émissions de la période 2000-2020 ne représentent qu'entre 15% et 20% du total des émissions cumulées entre 2000 et 2100.

système climatique. Il nous faut donc évaluer le « bon » degré de flexibilité en deçà duquel réduire l'inertie est positif, mais au-delà duquel réduire l'inertie est trop coûteux. Nous pourrions ainsi répondre à la question de savoir s'il est opportun d'augmenter de 13% à 40% de la chance de voir se réaliser la stabilisation des concentrations au niveau désiré initialement lorsque le coût total de la politique climatique augmente d'un facteur six. Nous anticipons ici qu'une telle analyse demande de mettre en regard les coûts de la flexibilité et les risques climatiques. Nous nous y employons dans ce chapitre, en commençant par aborder les aspects théoriques de la flexibilité et de sa mesure avant d'en proposer une évaluation numérique⁵.

1. Nature du legs et flexibilité

1.1. Une dynamique économique « fluide » ?

Nous avons distingué dans ce qui précède nos politiques de celles de nos descendants. Dater avec précision la limite entre ces deux périodes comporte bien entendu une grande part d'arbitraire⁶. Mais il existe une frontière bien réelle entre la période pendant laquelle notre génération contrôle effectivement l'élaboration et la mise en œuvre des politiques climatiques, et celle pendant laquelle d'autres que nous prendront les décisions, nous forçant aujourd'hui à faire un pari sur leur comportement.

Il existe cependant des investissements dont la durée de vie, voire le caractère irréversible, limitent les marges de manœuvre des générations futures longtemps après cet horizon de quelques dizaines d'années. Les infrastructures de transport ont ainsi une durée de vie de l'ordre du siècle. A la limite, la construction d'un barrage dont la retenue noie une vallée et oblige à déplacer un village, la décision d'enfouir des déchets nucléaires à tel endroit précis ou la destruction d'espèces animales et végétales constituent autant d'actes irréversibles qui s'imposent à tous nos descendants proches comme lointains.

Kenneth Arrow (1999) tend à minimiser la portée de cette constatation. Il note en effet que les investissements de très longue durée de vie restent marginaux par rapport à la masse totale des investissements. Il souligne de plus que si ce qui compte n'est pas tant la réalisation d'un programme d'investissement particulier, mais la quantité totale des investissements de même nature qui est réalisée pendant une période donnée, il devient alors difficile pour notre génération d'influencer les décisions de nos petits-enfants. Illustrons par un exemple ferroviaire : d'un point de vue macroscopique, nous pouvons aujourd'hui décider de léguer un très important réseau ferré à grande vitesse à nos petits-enfants. Si nous le construisons effectivement, ce réseau s'imposera à nos enfants. Mais ceux-ci peuvent tout à fait décider de sous investir dans le domaine ferroviaire, voire de ne pas y investir du tout : dans ce cas de figure, et sauf à supposer que nous procédions à des investissements particulièrement élevés, nos petits-enfants se retrouveraient avec une quantité totale de voies ferrées sensiblement équivalente à celle qu'ils en auraient obtenu en héritage si chacune des deux générations précédentes (la nôtre et celle de nos enfants) avait investi « normalement » dans le rail.

⁵ Les versions antérieures du modèle STARTS 2 présenté dans ce chapitre ont fait l'objet d'une communication à un colloque joint de l'AIE, l'IIASA et de l'EMF avec Jean-Charles Hourcade et Naceur Chaabane (Hourcade *et al.*, 1996b), puis d'un article paru dans *Energy Economics* (Lecocq *et al.*, 1998). Nous remercions par ailleurs Benoit Simon pour ses commentaires.

⁶ Outre le fait que les générations se chevauchent, l'observation du cycle de vie des politiques publiques d'environnement (Scimemi, 1987) nous montre qu'il existe en général un décalage temporel important entre la date de la décision et la date de la mise en œuvre effective des mesures. Pour ne pas introduire ici un débat sur les processus de décision qui dépasse largement notre propos, nous en resterons cependant à l'hypothèse simplificatrice selon laquelle qu'il existe une décision et que la mise en application est immédiate. Pour une discussion sur les différents tempos de la décision internationale, le lecteur pourra consulter Hourcade (1999).

Ce serait faire une mauvaise lecture du texte de Arrow que de considérer qu'il ignore que les équipements peuvent avoir des durées de vie très longues. Ce texte ne rejette pas non plus l'idée que, localement, le fait de réaliser ou non ces investissements puisse avoir une importance considérable. Il est évident que construire une voie ferrée à grande vitesse entre Paris et Strasbourg n'aura pas le même impact pour la Lorraine qu'une même ligne construite entre Bordeaux et Marseille. Mais l'argument consiste à remarquer que du point de vue du climat global, la grandeur pertinente est la quantité totale d'émissions, et donc dans le cas des transports la quantité totale de voies de communication construites sur un territoire donné. L'hypothèse qui est formulé ici est donc la suivante : dès lors que l'on se place à une échelle macroscopique et que la localisation géographique n'est pas véritablement significative pour le problème considéré, l'irréversibilité locale perd de l'importance au profit d'une quantité nettement plus fluide à l'horizon de deux générations.

Nous nous trouvons ici devant une conception que nous qualifierons de « fluide » de la croissance économique dans laquelle les marges de manœuvre d'une génération sont suffisamment importantes pour qu'elle puisse s'affranchir rapidement de l'héritage de ses prédécesseurs. De ce point de vue, la théorie de la croissance agrégée fondée sur la production d'un unique bien composite servant à la fois à la satisfaction de tous les besoins et à l'accroissement du stock d'un capital unique contribue à diffuser cette idée de grande flexibilité : lorsque ne compte *in fine* qu'une quantité totale, les marges de manœuvre de chaque génération sont très importantes⁷.

1.2. ... ou « rigide » ?

La conception « fluide » de l'économie décrite au-dessus repose cependant sur l'hypothèse implicite selon laquelle le capital aujourd'hui est substituable au capital aujourd'hui, et le capital aujourd'hui est substituable au capital demain. Ce « principe de compensation » implicite demande à être discuté. Le fait que l'irréversibilité locale se « dilue » lorsque l'on passe à une échelle agrégée demande tout d'abord à être examiné plus en détail. Pour reprendre l'exemple des voies TGV, peut-on considérer comme « équivalentes » une France qui développe prioritairement ses transports vers Strasbourg et l'Allemagne et une France qui investirait, par exemple, dans le percement d'un tunnel ferroviaire vers Turin et l'Italie ? Cette question dépasse cependant largement le cadre de cette thèse. Nous nous tournons donc ici vers une seconde critique, plus simple, qu'il est possible d'adresser au « principe de substituable » entre capital et capital : la quantité totale de capital masque la diversité des technologies capables de produire un même bien ou service. Si cette distinction peut s'avérer inutile du point de vue de la richesse totale, elle se révèle par contre critique du point de vue climatique : les niveaux d'émissions à niveau de production donnée peuvent en effet être très différents, comme en témoignent les quelques exemples rassemblés dans le tableau 6.1 ci-dessous.

Service		Quantité d'émissions
Energie	Charbon	211 gC/kWh
	Gaz	112 gC/kWh
	Nucléaire	0 gC/kWh
Transport	TGV	109 gC/100 voyageurs.km
	Voiture Particulière	2720 gC/100 voyageurs.km
	Avion	4140 gC/100 voyageurs.km

⁷ L'analyse développée par Arrow fournit une justification théorique pour les auteurs qui tirent argument des risques de « *free riding* » de nos descendants pour s'opposer à des transferts massifs vers les générations futures au nom du climat. Pour ces auteurs, nous n'avons en effet aucun moyen de garantir que les sommes que nous aurons patiemment épargnées pour dédommager nos descendants des dégâts que nos émissions leur occasionneront ne seront pas détournées par des générations intermédiaires peu scrupuleuses ou simplement soumises à des pressions budgétaires à court terme. Toute leur analyse repose en effet sur l'hypothèse centrale selon laquelle tout investissement est à très long terme aussi flexible qu'un investissement de type financier. Robert Lind (1995) ou Thomas Schelling (1995) utilisent d'ailleurs explicitement la métaphore d'un fonds d'indemnisation des victimes du changement climatique de nature purement monétaire.

Tableau 6.1 : Emissions comparées de plusieurs technologies assurant des services similaires dans le domaine de l'énergie et des transports (en grammes de carbone par unité de service rendu, Source : Enerdata)

Distinguer les technologies entre elles change la manière dont se pose le problème de l'impact des équipements à longue durée de vie sur le degré de flexibilité que nous transmettons à nos descendants. En effet, la durée de vie de certains investissements construits aujourd'hui dépasse deux ou même trois générations. C'est le cas en particulier des équipements énergétiques, des infrastructures de transport ou des bâtiments par exemple. De fait, chaque génération ne construit elle-même qu'une partie des équipements qu'elle utilise pour produire les biens ou service correspondant, et s'appuie largement sur le capital qui lui a été légué par les générations précédentes. Si cette génération hérite d'un capital fortement émetteur de CO₂, sa marge de manœuvre climatique sera alors relativement étroite. Elle ne peut en effet jouer que sur la fraction des équipements qu'elle installe elle-même, sauf à mettre au rebut du capital encore utilisable et s'exposer ainsi à des coûts d'investissement très élevés. Dès lors que sont distingués les différents systèmes techniques sous-jacents à la production totale agrégée, la nature du capital à longue durée de vie que nous laissons devient ainsi un facteur important pour influencer la flexibilité dont disposeront nos descendants. Nous avons souligné au chapitre 2 que l'inertie globale du système économique a une forte importance sur le dessin des politiques climatiques.

Dans le raisonnement qui vient d'être mené, nous avons insisté sur le fait que la marge de manœuvre dont dispose chaque génération est limitée par le fait qu'elle ne construit elle-même qu'une fraction du capital qu'elle utilise pour la production, fraction plus ou moins grande selon la durée de vie des équipements considérés. Mais même sur cette fraction du capital qu'elle « contrôle », le choix peut être limité par des mécanismes induits qui tendent à renforcer des choix qui ont été faits auparavant. Illustrons ce point en reprenant l'exemple des transports. La combinaison de quarante ans de politiques d'investissements en infrastructures, de politiques fiscales sur les transports et de politiques d'aménagement du territoire (en particulier via la fiscalité) ont constitué en France un système technique et économique cohérent autour de la route (Martin, 1998, 1999) : le développement de villes de plus en plus étendues qui augmente la demande de transport, la présence d'une industrie automobile forte, le développement d'un secteur du transport routier politiquement très puissante concourent à créer un système duquel il est difficile de sortir. Ainsi, dans ses scénarios à 2020, le Commissariat Général au Plan rappelle que le secteur des transports « ne peut manquer d'être la cible privilégiée de politiques climatiques » (CGP, 1998, p.42)⁸. Mais même dans son scénario le plus environnementaliste, la part du rail à 2020 reste faible : la limitation des émissions devra être réalisée au sein du système routier, qui apparaît ainsi comme très difficile à contourner aujourd'hui. Nous nous trouvons donc ici devant un second facteur qui influence la flexibilité que nous laissons à nos descendants : des dynamiques économiques « auto-renforçantes ».

Revenons maintenant aux fondements théoriques de ces mécanismes. Dans le modèle de Arrow et Debreu, le système économique qui émerge de la rencontre entre les agents, munis de préférences et de dotations initiales, et de technologies, offrant des potentiels de production, est essentiellement réversible. En dynamique, il existe en revanche des mécanismes qui font que, au-delà d'un certain point, les forces du marché tendent à consolider le premier choix au moyen d'un processus auto-renforçant et rendent très coûteux tout retour en arrière (Hourcade, 1993). Parmi ces mécanismes, nous pouvons citer ici :

- Les rendements d'échelle croissants traduisent le fait que sous certaines conditions, plus les quantités produites sont importantes, plus les coûts de production d'un produit donné sont faibles.

⁸ Les émissions du secteur des transports sont passées de 26 à 36 MtC en France entre 1980 et 1993, soit une augmentation de 39%, alors que les émissions de tous les autres secteurs économiques diminuaient dans le même temps (Martin, 1997).

- Le « *learning by doing* » (Arrow, 1962) représente le fait que plus une technologie est utilisée, plus les agents acquièrent de l'expérience à son sujet, et plus elle peut être améliorée.
- Les externalités positives de réseau (Katz et Schapiro, 1985), traduisent le fait que plus le nombre d'utilisateurs d'une technologie augmente, plus elle présente d'intérêt pour un tiers.
- Les rendements croissants d'information traduisent le fait que plus une technologie est adoptée, plus les risques qui lui sont associés sont connus et limités⁹.

Une fois passé le point de bifurcation, l'économie entre dans un « *lock-in* » technologique (Arthur, 1989). Dans un monde de compétition entre technologies, il existe à la date t plusieurs équilibres de marché possibles à la date $t+n$. Ces équilibres sont souvent indiscernables d'un point de vue économique. Le choix de telle ou telle trajectoire dépend donc de la décision initiale, qui n'est pas forcément comprise sur le moment comme un choix stratégique déterminant, ainsi que des anticipations à cette même période¹⁰ (Krugman, 1991). Une fois passé ce point de bifurcation, la réorientation du système peut s'avérer très coûteuse, et ce d'autant plus qu'elle doit se faire dans un délai court¹¹.

Le développement du parc électronucléaire français constitue un bon exemple d'un tel mécanisme. Mis en œuvre après le premier choc pétrolier au nom de l'indépendance énergétique du pays, il a permis le développement d'un savoir faire très important en matière de construction de centrales. Le kilowatt heure nucléaire coûtait ainsi à l'investissement 1312 écus en France en 1990 contre 1963 écus au Japon ou 2555 écus en Allemagne¹². Outre la durée de vie des centrales, la spécialisation de l'industrie nationale dans le domaine nucléaire ainsi que le développement du chauffage électrique dans les bâtiments renforcent le « *lock-in* » technologique dans lequel nous nous trouvons engagés. De manière remarquable, le bilan de stratégies pourtant très différentes suivies par d'autres pays comparables à la France pour faire face au choc pétrolier est aujourd'hui à peu près comparable (Hourcade et Kostopoulou, 1994).

Si les phénomènes de bifurcations et de « *lock-in* » contribuent à fermer des portes, les aléas économiques ainsi que les progrès technologiques contribuent à nous en ouvrir de nouvelles. Le progrès technique ne semble cependant pas constituer un outil suffisant pour faire disparaître l'ensemble des inerties engendrées par les mécanismes auto-renforçants¹³. L'histoire économique récente suggère en effet qu'il faut environ 50 ans à toute nouvelle source d'énergie pour passer de 1% à 50% de sa part de marché potentielle ultime. Ce laps de temps est nécessaire pour éliminer les barrières à la diffusion des innovations dues aux institutions et au fonctionnement même des marchés ainsi que les obstacles causés par les asymétries d'information et les anticipations imparfaites. Plusieurs exemples dans le secteur énergétique viennent renforcer cette relative circonspection dans la

⁹ Nous ne prétendons pas résumer ici les débats complexes de la littérature économique sur l'adoption des technologies (Foray, 1989). Simplement, les mécanismes énumérés ici sont tous caractérisés d'une manière ou d'une autre par des rendements croissants. Notons d'ailleurs que certains d'entre eux n'ont pas été modélisés dans l'objectif premier d'analyser la compétition entre technologies. Arrow développe ainsi une analyse du « *learning by doing* » dans un modèle à un seul secteur afin d'examiner l'écart qu'une telle externalité introduit entre l'équilibre de marché et l'optimum social.

¹⁰ Depuis le développement de la théorie des « tâches solaires » (Azariadis et Guesnerie, 1986), la pluralité des équilibres induits par différents jeux d'anticipations menant à des processus auto-réalisateurs a été mise en évidence dans d'autres champs de l'économie que le développement technologique.

¹¹ La localisation des activités de production et des agents génère aussi des mécanismes auto-renforçants de nature géographique (Krugman, 1993).

¹² Moynet G. [1991] "Coûts de production de l'énergie électrique. Evaluation faite en 1990 pour les équipements devant être mis en service en 2000", Communication au Groupe d'experts des coûts de production de l'énergie électrique, UNIPED, juin. Cité par Hourcade et Kostopoulou (1994).

¹³ Il ne s'agit pas ici de nier le rôle important de l'innovation pour la dynamique de la croissance globale de l'économie que met en particulier en avant la théorie de la croissance endogène (Aghion et Howitt, 1998). Nous souhaitons simplement souligner ici le fait que localement, les inerties liées à l'adoption d'un système technique particulier peuvent ralentir considérablement la pénétration de technologies alternatives.

capacité du changement technique à venir à bout de toutes les inerties : la très faible pénétration en France de systèmes décentralisés pour la production d'électricité sur la base d'énergies renouvelables (Colombier et Hourcade, 1989) ou le faible développement des biocarburants (Fallot, 1999).

A une vision continue et « fluide » de la dynamique économique s'oppose ainsi une représentation discrète et plus « visqueuse » dans laquelle certains secteurs s'engagent dans les mécanismes de « *lock-in* » technologiques et institutionnels, tandis que d'autres voient leur horizon s'élargir du fait du progrès technique ou d'événements contingents. La flexibilité dont disposeront nos descendants dépend donc à la fois de la nature du capital à longue durée de vie que nous leur transmettons, mais aussi de la « force » des dynamiques auto-renforçantes qui caractérisent le système technique que nous leur léguons. Ce point n'est pas sans rappeler le débat sur la nature « *putty* » ou « *clay* » des fonctions de production.

1.3. De l'évaluation de la flexibilité

Une fois identifiés les facteurs qui contribuent à limiter la flexibilité, il nous faut en évaluer l'importance économique. Comme nous l'avons dit dans l'introduction de ce chapitre, la flexibilité n'est pas un bien ou un mal en soi. Si l'utilité de la consommation reste la mesure ultime du bien-être des individus, alors l'inertie n'est importante que si, par sa présence, elle est susceptible de limiter les capacités d'adaptation des agents et, partant, de réduire leur niveau de consommation. L'évaluation de l'inertie relativement au changement climatique suppose ainsi de croiser les capacités d'adaptation du système technique que nous transmettons à nos descendants avec la manière dont nous évaluons les risques que le climat ne les contraigne à changer rapidement de trajectoire d'émissions.

1.3.1. Le raisonnement coûts avantages sous incertitudes

Le chapitre 2 nous a donné les clés pour évaluer les coûts que pourraient avoir à subir nos enfants et leurs descendants du fait du climat. Soit en effet un héritage que nous transmettons à nos enfants, héritage caractérisé par une richesse, un état de l'environnement ainsi qu'une flexibilité du système technique. Si nous nous donnons une distribution de probabilités sur la nature réelle des dommages du changement climatique, nous pouvons calculer une l'espérance des coûts pour nos descendants en calculant pour chaque fonction de dommages possible la trajectoire climatique optimale que nos descendants devraient suivre en fonction de cette information, puis en tirant de cette trajectoire un coût total actualisé, et enfin en pondérant ces coûts par les probabilités d'occurrence des différents états du monde (i.e. des fonctions de dommages) possibles.

Le calcul du coût espéré du changement climatique pour nos descendants repose sur trois séries d'hypothèses. Les premières concernent les risques climatiques, les secondes les coûts de réduction des émissions à long terme et les troisièmes le scénario de croissance économique à long terme. Le contenu de ces hypothèses dépend pour une bonne part, mais pas uniquement, de la nature de l'héritage que nous aurons transmis à nos descendants. Par exemple, la croissance économique à long terme dépend de ce que notre génération aura fait, et donc de ce qu'elle aura légué à ses successeurs, mais elle dépend aussi de nos anticipations quant aux limites ultimes du progrès technique, ou à la taille des réserves d'énergie fossiles, paramètres essentiellement indépendants de la nature de ce que nous transmettons à nos descendants. Le coût espéré que nous calculons ici représente donc ce que, étant donné nos propres connaissances et nos propres anticipations sur les termes du changement climatique, nos descendants pourraient avoir à payer en fonction de la politique que nous aurons suivie et ce que nous leur aurons transmis.

Ce calcul repose cependant sur deux hypothèses qui demandent à être discutées. En premier lieu, même si notre génération peut décider aujourd'hui de la politique climatique qu'elle entend mener pendant qu'elle reste « aux commandes » de l'économie, le résultat de cette politique à un horizon de 20 ou 30 ans est particulièrement incertain. Ce résultat dépend en effet fortement d'hypothèses formulées sur la nature de la croissance économique entre aujourd'hui et 2020 : autrement dit, la

nature de l'héritage est elle-même conditionnelle à des hypothèses sur le scénario de référence à moyen terme. Néanmoins, distinguer ce qui concerne notre génération de ce qui concerne des suivantes nous paraît pertinent. Ce découpage correspond en effet à une distinction ontologique entre nous et nos successeurs. Autrement dit, même si la nature du legs est incertaine, ce legs n'en reste pas moins un repère incontournable pour fonder nos décisions.

En second lieu, le calcul proposé plus haut suppose implicitement que nos enfants disposent d'une information complète sur la nature du changement climatique. Or il n'y a *a priori* aucune raison pour que le processus scientifique fournisse l'ensemble des réponses sur le changement climatique au moment où nous passerons le flambeau à nos descendants. Mais le problème n'est pas tant de fixer arbitrairement une date d'arrivée de l'information, que de ne pouvoir prendre en compte des politiques qui joueraient sur cette date. Nous avons en effet vu au chapitre 2 que le critère de maximisation de l'utilité espérée devait être manié avec beaucoup de précautions dès lors que, pour des décisions séquentielles, la date d'arrivée de l'information était variable. Ce point demande à être travaillé ultérieurement de manière plus approfondie.

Une fois ce calcul effectué, il nous faut revenir à la question centrale, qui est celle du choix d'une politique climatique à court terme. *In abstracto*, la meilleure politique climatique à court terme est celle qui minimise la somme actualisée des coûts de la politique climatique pour notre génération et des coûts espérés pour nos descendants. Nous retrouvons ici un raisonnement en maximisation de l'utilité espérée tel que nous l'avons décrit au chapitre 2 puis mis en œuvre au chapitre 3. La flexibilité n'est alors plus représentée en tant que telle, mais elle est prise en compte directement dans le calcul des coûts espérés des politiques climatiques pour la génération future.

1.3.2. Mesures directes de la flexibilité

Le raisonnement précédent est le plus pur sur le plan économique. Il présente néanmoins le défaut de nécessiter une très importante quantité d'informations pour pouvoir être mené à bien, et de dissimuler le rôle de l'inertie au milieu d'un coût futur très agrégé. En outre, nous revenons à un seul indicateur global, alors que notre motivation dans ce chapitre est précisément de proposer une représentation plus riche et plus complète des dynamiques économiques. Faut-il dès lors s'en tenir à la simple description « littéraire » des marges de manœuvre que nous laissons à nos descendants ? Cette solution présenterait l'avantage de faire apparaître clairement les différentes composantes de l'héritage, mais une telle description risque fort d'être « classée sans suite » parce qu'elle n'est pas chiffrée. Elle présente en outre le défaut de ne pas faire apparaître le lien profond entre la flexibilité et l'évaluation des risques climatiques.

Dans ce contexte, le concept de valeur d'option (ou de quasi-option) développé simultanément par Claude Henry (1974) et par Kenneth Arrow et Stanley Fischer (1974) présente l'immense avantage de fournir un indicateur simple du « coût de la flexibilité ». Dans ces travaux fondateurs, l'objectif des auteurs est de révéler qu'une analyse coûts avantages qui chercherait à évaluer l'opportunité d'un investissement irréversible en ignorant que des informations sur les conséquences de cet investissement sont susceptibles d'être révélées dans le futur biaise le résultat en faveur du choix irréversible. La valeur d'option mesure précisément l'ampleur de ce biais. Le concept a ensuite été étendu à une gamme de problèmes plus large dans laquelle l'information est croissante et les investissements considérés peuvent limiter en partie seulement les marges de manœuvre (Hanemann, 1989). Dans ce contexte, la valeur d'option se définit toujours comme le biais induit par une analyse coûts avantages qui ignorerait le fait que l'information peut être croissante, mais ce biais peut maintenant être négatif.

La valeur d'option est ainsi un indicateur local qui compare deux politiques parmi toutes les politiques climatiques envisageables. De ce fait, il est possible d'obtenir autant de valeurs d'options qu'il existe de couples de politiques envisageables. Nous découvrons ici une limitation de la capacité de ce paramètre à évaluer de manière globale la flexibilité. Une première solution consiste à faire appel à des points de repère conventionnels, comme par exemple comparer deux politiques « représentatives »

des débats en cours¹⁴. Utiliser un second indicateur tel que la mesure de l'écart d'abattement entre la trajectoire d'abattement optimale sans tenir compte de l'information croissante et la trajectoire d'abattement optimale avec information croissante telle que révélée par exemple par Ha-Duong *et al.* (1997) constitue une seconde solution qui a le mérite de compléter la valeur d'option en unités monétaires par un indicateur global relatif aux efforts d'abattement exprimé en unités physiques.

Ces réserves étant formulées, la valeur d'option n'en constitue pas moins un outil particulièrement utile pour la discussion. Elle illustre en effet le résultat suivant : si le calcul ne prend pas en compte le fait que l'information est croissante, alors il fournit un résultat inexact. Du point de vue de la théorie économique, cet énoncé est trivial. Mais dans un monde dans lequel le calcul est par nature un calcul approché, il prend une importance considérable. En pratique, il est en effet nécessaire de disposer d'indicateurs permettant de mettre en évidence l'erreur que nous commentons en oubliant l'arrivée d'informations supplémentaires. Le résultat de Minh Ha-Duong (1998b), qui estime que « *the magnitude of option value is very significant, about 50% of the cost* » (p.617), est ainsi particulièrement important pour mettre en évidence l'importance de la prise en compte simultanée des inerties environnementales et des inerties technologiques.

Mais produire un tel résultat suppose de disposer d'un modèle représentant un monde hétérogène. Nous avons débuté cette thèse par la pure métaphore d'un monde à un seul agent et à un seul bien. La discussion sur l'héritage nous force à abandonner cette représentation. Chaque individu se préoccupe en effet de manière différente des générations futures, et n'a donc pas la même proportion à épargner. Or la coordination de cette manière de prendre en compte nos descendants est capitale, nous l'avons vu au chapitre 4, pour faire en sorte qu'un accord sur l'action collective à mener à court terme puisse être trouvé. La réflexion sur les lieux de flexibilité et d'inerties socio-techniques que nous transmettons à nos descendants nous impose de la même manière de dépasser le cadre d'un modèle à un seul bien pour mettre correctement en évidence le rôle des mécanismes induits dans les dynamiques économiques. Nous en proposons une première évaluation à la section suivante.

2. Première approche numérique du rôle de l'inertie différentielle dans l'évaluation des politiques climatiques

Nous nous proposons dans cette seconde section d'essayer d'évaluer numériquement l'impact de la plus ou moins grande flexibilité que nous transmettons à nos descendants sur la nature de la décision en matière climatique. Nous avons isolé plus haut de deux éléments cruciaux qui concourent à cette flexibilité : la durée de vie des équipements que nous transmettons à nos enfants, et la force des dynamiques auto-renforçantes que nous leur léguons.

L'analyse normative des politiques climatiques en présence de mécanismes cumulatifs doit cependant surmonter deux obstacles très difficiles. En premier lieu, la présence de rendements croissants autorise l'existence d'équilibres multiples. Distinguer entre ces différents équilibres suppose de pratiquer une analyse globale et non plus locale de l'espace des solutions admissibles, ce qui s'avère souvent difficile dès lors que les problèmes deviennent un tant soit peu complexes. Or lorsque l'espace des solutions ressemble plus au dos d'un hérisson qu'à autre chose, un solveur numérique à toutes les chances de ne pas converger vers le bon optimum. A ce problème purement analytique s'ajoute une question de données : le rôle des mécanismes induits se révèle souvent difficile à isoler et encore plus à chiffrer (Newell *et al.*, 1998). La calibration du modèle a donc de fortes chances d'être controversée. La très lente introduction du progrès technique induit dans les modèles climatiques témoigne des difficultés de l'entreprise (Grübler et Gritsevskii, 1997, Goulder et Schneider, 1996).

¹⁴ On pourra par exemple mesurer la valeur d'option de manière conventionnelle en comparant les trajectoires d'abattement prônées par Wigley *et al.* (1996) avec les trajectoires proposées par le groupe I du GIEC dans son second rapport (Ha-Duong, 1998b)

Nous nous proposons ici d'adopter une approche plus modeste en laissant de côté la question des mécanismes induits pour nous concentrer sur le premier facteur qui contrôle la flexibilité que nous transmettons à nos descendants : la durée de vie du capital. Nous avons déjà abordé cette question dans la dernière section du chapitre 2 en discutant les résultats de Ha-Duong *et al.* (1997). Nous avons nous-mêmes introduits dans le modèle STARTS un coefficient d'inertie afin de rendre compte de l'inertie du capital. Dans ces deux approches, le traitement du capital reste néanmoins très abstrait, et appelle des critiques.

- D'une part, ni STARTS, ni le modèle DIAM utilisé par Ha-Duong *et al.* ne distinguent les différentes générations de capital. La structure démographique des équipements installés leur échappe donc complètement, ce qui les empêche de prendre en compte des phénomènes tels que l'arrivée en fin de vie simultanée entre 2010 et 2020 de la majeure partie du parc nucléaire français.
- D'autre part, aucune différenciation sectorielle du capital n'est autorisée. Or les voitures, les bâtiments, les usines, les centrales énergétiques ou les infrastructures de transport ont des durées de vie qui s'échelonnent de quelques années à plus d'un siècle. L'hétérogénéité de ces durées de vie implique naturellement des inerties différenciées selon les secteurs économiques.

Nous nous proposons de répondre ici à ces deux critiques en développant une nouvelle version du modèle présenté au chapitre 1. Cette version, dénommée STARTS 2, comporte deux secteurs, l'un rigide et l'autre flexible. Le choix d'une représentation à deux secteurs résulte d'un compromis entre la clarté analytique, le nécessaire contrôle numérique de nos résultats et le réalisme empirique de notre représentation. Nous proposons dans un premier temps une taxonomie des formes d'inerties mises en jeu (section 2.1). Ensuite, après avoir présenté STARTS 2 (section 2.2), nous discuterons les résultats de simulations numériques centrées autour des deux questions suivantes : (i) comment l'abattement devrait-il être distribué entre secteurs sous l'hypothèse d'anticipations parfaites, (ii) sur quel secteur reposeraient les coûts d'une accélération de la réduction des émissions en cas de « retard » dans la mise en œuvre des politiques climatiques.

2.1. Représentation de l'inertie différentielle

2.1.1. Retour sur les déterminants de l'inertie

Les controverses entre les analyses « top-down » et « bottom-up » autour de l'efficacité énergétique des technologies finales sont importantes pour la détermination des objectifs de réduction des émissions à court terme, mais elles laissent de côté les mécanismes les plus importants sur le long terme. La demande d'énergie finale dépend en effet non seulement de l'efficacité des équipements mais aussi des changements structurels dans les secteurs de production (part des énergies intensives en énergie dans le PIB), dans l'habitat et dans les styles de vie. En d'autres termes, une bonne part de la demande d'énergie finale est contrôlée par des paramètres extérieurs au secteur énergétique, et dont l'inertie peut s'avérer très importante. Mark Jaccard (1997) décrit la grande diversité du capital par une hiérarchie de trois niveaux de décision qui en gouvernent la dynamique. Nous pouvons reformuler sa taxonomie de la manière suivante :

- Les équipements « end-use » : la durée de vie de ces équipements s'étend de quelques années à deux décennies environ. Les décisions les concernant sont prises par les agents privés (ménages, services des entreprises). A ce niveau, le critère déterminant est le coût d'un service énergétique donné (sous contrainte d'asymétrie d'information et d'autres imperfections de marché).
- Les équipements d'infrastructure et les processus industriels : cette seconde catégorie englobe les bâtiments, les principaux modes de transport et les infrastructures industrielles dont la durée de vie se mesure en décennies. A ce niveau, la décision est principalement le fait d'entités centralisées publiques ou privées, les montants de capital en jeu étant largement supérieurs à ceux

des décisions de la catégorie précédente. L'une des difficultés principales réside dans le fait que, excepté dans le dessin des systèmes énergétiques eux-mêmes, les coûts de l'énergie ne jouent qu'un rôle mineur dans la décision comparés, par exemple, à des critères stratégiques dans le domaine industriel ou au ratio coûts/vitesse dans le domaine des transports.

- L'aménagement du territoire et la planification urbaine : ce niveau est dirigé à la fois par les décisions en termes d'infrastructures et par des politiques publiques spécifiques. Ces politiques peuvent être soit explicites, c'est-à-dire avoir pour objectif déclaré d'influer sur les formes urbaines ou sur la distribution spatiale de la population, soit être implicites, c'est-à-dire influencer l'usage des sols et les formes des villes par des subventions à la mobilité, ou des règles régissant les relations entre locataires et propriétaires. Modifier les tendances à ce niveau d'agrégation n'est donc pas uniquement un problème de renouvellement du capital.

L'inertie du système économique résulte principalement des interactions entre ces trois niveaux. Par exemple, l'architecture des bâtiments détermine les besoins en climatisation. Plus encore, les formes urbaines déterminent non seulement les besoins en transport mais aussi la part relative des déplacements effectués à pieds, à vélo, en train ou en voiture particulière. Les mécanismes d'attraction des activités à proximité des infrastructures de transports, les investissements alors induits, la nature des compétences développées et le montant des intérêts ainsi construits génèrent des dynamiques qu'il est difficile de modifier facilement. Nous retrouvons ici un exemple des mécanismes à rendements croissants que nous avons mentionnés dans la section précédente.

2.1.2. Un nécessaire compromis entre réalisme et simplicité

Les modèles disponibles dans le domaine énergétique incorporent des descriptions du système de production d'énergie à un niveau de désagrégation qui varie en fonction des données, des capacités informatiques et des objectifs du modèle. Ils agrègent des données sur les coûts et les inerties, qui, quelles que soient leurs imprécisions, permettent de mener des expériences numériques raisonnables. Mais tel n'est pas le cas pour les déterminants de la demande d'énergie finale, qui sont pourtant tout aussi importants pour comprendre l'inertie de l'ensemble du système.

Nous sommes ainsi confrontés en pratique à un manque important de données harmonisées sur le taux de rotation du capital à chacun des niveaux hiérarchiques proposés par Jaccard, et à un cloisonnement professionnel très fort entre les experts de chacun des domaines concernés. Les modèles dont nous disposons représentent ainsi la pénétration des voitures propres mais pas les liens entre la structure des modes de transport et les besoins de déplacement, la pratique courante consistant à s'appuyer sur des hypothèses exogènes pour ces paramètres. Un utilisateur inattentif pourrait donc en tirer des conclusions faussées, comme une demande de transport dans les pays en voie de développement projetée sans considérer le manque d'infrastructures ou des scénarios de réduction des émissions dans lesquels les coûts sont sous-estimés du fait d'une absence de liaison entre développement des infrastructures et augmentation de la demande de mobilité.

Capter les principaux déterminants de l'inertie du changement technique représente donc un défi pour les modélisateurs. Dans ce contexte, le modèle STARTS 2 constitue une réponse partielle, dans laquelle nous ne nous intéressons qu'aux deux premiers niveaux hiérarchiques de la hiérarchie de Jaccard. En l'absence de données et de connaissances suffisantes, les déterminants non énergétiques de la demande d'énergie (le troisième niveau hiérarchique de Jaccard) sont représentés uniquement par la comparaison entre scénarios de référence différents.

Par rapport à la version à un seul secteur présentée au chapitre 1, STARTS 2 constitue une première tentative pour démêler les différentes sources d'inertie à l'œuvre. Sa structure simple bâtie autour de deux secteurs nous permet de limiter le recueil de données et de conserver la clarté de la démonstration. En contrepartie, nous acceptons ici la perte de réalisme consistant à nous appuyer

uniquement sur deux secteurs, et non sur quatre ou cinq comme retenu dans la plupart des analyses sectorielles désagrégées¹⁵.

2.1.3. Fonctions de coûts : « leap-frogging » contre rotation accélérée du capital

Rappelons nous avons retenu pour le modèle STARTS une représentation agrégée de l'inertie au moyen d'un « facteur d'accélération » défini comme un multiplicateur des coûts d'abattement. Ce facteur vaut 1 lorsque la vitesse de réduction des émissions reste en deçà d'une valeur limite, mais progresse linéairement avec la vitesse si celle-ci dépasse la limite (section 2.1.3 b). Cette représentation permet de capturer l'effet de seuil liée à l'introduction de l'inertie. Par contre, ce facteur traduit mal ce qu'il est sensé représenter, à savoir la durée de vie du capital. Pour bien faire, la valeur limite de la vitesse de réduction des émissions devrait en effet varier en fonction de la structure des générations de capital, ce qui n'est pas le cas.

Dans STARTS 2, une telle possibilité est explicitement représentée en distinguant le renouvellement du capital de la pénétration des nouvelles technologies. Le modèle STARTS 2 considère en effet que réduire les émissions de gaz à effet de serre d'une quantité donnée impose un arbitrage entre les deux paramètres suivants :

- L'achat de technologies moins émettrices en CO₂ : si le montant de l'investissement est constant, il peut alors être nécessaire d'aller plus vite que la progression naturelle de la décarbonisation de l'économie et aller chercher des technologies plus chères, mais moins émettrices. Il s'agit d'un mécanisme de saut technologique ou de « leap-frogging » en anglais.
- L'accélération du taux de renouvellement du capital : l'autre manière de réduire les émissions consiste à remplacer plus vite les générations de capital les plus anciennes (et les plus polluantes) pour les remplacer par du capital neuf avant la fin de leur durée de vie économique.

Supposons par exemple une économie forcée de réduire ses émissions de 25% en 10 ans, et dont le taux normal de rotation du capital est précisément de 25% par décennie. Pour répondre à ses obligations, cette économie peut investir dans une technologie non émettrice (par exemple une centrale solaire). Cependant, le coût d'une telle technologie peut être très élevé, et il peut s'avérer plus économique de remplacer une centrale existante de plus pour installer à leur place deux centrales au gaz émettant chacune moitié moins que les centrales anciennes. Le point d'équilibre est atteint lorsque le coût marginal de réduction des émissions est égal au coût de remplacement prématuré d'une unité de capital.

2.2. Structure mathématique du modèle

Le modèle STARTS 2 est un modèle d'optimisation des politiques de réduction des émissions de gaz à effet de serre mondiales sous contrainte de non dépassement d'un plafond de concentration atmosphérique en CO₂. Un bien composite unique assure à la fois la satisfaction des besoins de l'individu représentatif de chaque génération (consommation) et l'accroissement du stock de capital (investissement). A la différence du modèle présenté dans la section 1, deux types de capital différents sont ici nécessaires pour assurer la production du bien composite. Chacun de ces secteurs est caractérisé par une durée de vie du capital et des potentiels de décarbonisation différents. Le lecteur trouvera en page 182 un résumé du modèle et en annexe 3 le code informatique.

¹⁵ Une nouvelle version de STARTS, aujourd'hui en cours de développement au CIRED, comprendra 4 secteurs : l'offre d'énergie qui pourra être calibrée sur les résultats des modèles énergétiques existants, les transports, l'habitat et l'industrie. Cette représentation nous permettra de clarifier la distinction entre les différents types de capital en jeu. En outre, elle nous permettra de représenter le fait que l'élasticité prix de la demande énergétique évolue de manière très différente selon le secteur considéré.

2.2.1. Structure du capital

a) Générations de capital par secteur

Le temps est divisé en périodes de longueur égales indicées par t . La durée de la période est de Δ années. Dans chacun des secteurs (indicés par s) coexistent à la période t un nombre n_s de générations de capital. n_s représente ainsi la durée de vie du capital mesurée en périodes dans le secteur s ¹⁶. Nous supposons dans tout cet exercice que la durée de vie du capital dans chacun des secteurs reste constante tout au long de la période d'analyse.

Nous notons K_{vts} la quantité de capital dans chacune de ces générations, notation dans laquelle l'indice v indique le numéro de la génération¹⁷ ($v \in \{1, 2, \dots, n_s\}$). Nous comptons par convention les générations de capital vers le passé : de fait, la génération 1 est la génération de capital la plus récente, c'est-à-dire la génération de capital correspondant à l'investissement de la période précédente, et la génération numérotée n_s est la plus ancienne. De la même manière, K_{1ts} représente à la période t et dans le secteur s la quantité de capital de la génération la plus récente, c'est-à-dire la quantité de capital produite par l'investissement à la période précédente alors que K_{nts} représente la quantité de capital appartenant à la génération de capital la plus ancienne. Nous notons enfin K_{ts} la quantité totale de capital dans chaque secteur, calculée comme la somme des quantités de capital dans chacune des générations.

$$K_{ts} = \sum_{v=1}^{n_s} K_{vts} \quad (6.1)$$

b) Emissions de CO₂ de chaque secteur

Le capital construit à chaque période t dans le secteur s est caractérisé par un indice d'émissions par unité de capital noté ϵ_{ts} . Cet indice traduit la quantité de CO₂ produite chaque année par l'utilisation, pour la production, d'une unité de capital. Les émissions E_{ts} annuelles totales du secteur s à la période t sont supposées dépendre directement du stock de capital¹⁸ par la relation suivante¹⁹ :

$$E_{ts} = \sum_{v=1}^{n_s} K_{vts} \cdot \epsilon_{t-v,s} \quad (6.2)$$

Les indices d'émissions ϵ_{ts} constituent le premier jeu de variables de contrôle de notre modèle. Il est en effet possible à chaque période de faire en sorte que l'indice d'émissions du capital nouvellement investi soit plus faible que l'indice de référence $\bar{\epsilon}_{ts}$, qui représente l'évolution de ces paramètres dans la trajectoire de référence. Nous imposons en outre que l'indice d'émissions soit positif et inférieur ou égal à l'indice de référence, soit :

$$0 \leq \epsilon_{ts} \leq \bar{\epsilon}_{ts} \quad (6.3)$$

2.2.2. Fondements macroéconomiques

Le modèle STARTS à deux secteurs repose comme son petit frère présenté dans le chapitre 1 sur un modèle de croissance très simple. La fonction de production permet de combiner travail et capital dans

¹⁶ Le produit $n_s \cdot \Delta$ représentant la durée de vie du capital dans le secteur s mesurée en années.

¹⁷ Nous pouvons aussi interpréter v comme le numéro de la série de capital, en reprenant une image de Arrow (1962).

¹⁸ Nous ne retenons donc pas la possibilité d'une sous utilisation du capital comme le font Dasgupta et Goran-Mäler (1999).

¹⁹ L'indice $t-v$ apposé aux indices d'émissions ϵ dans la relation (6.2) provient du fait que de part notre convention sur la numérotation des générations, plus v augmente, plus la génération de capital considérée est ancienne.

chacun des secteurs pour assurer la production annuelle de bien composite (équation 6.4). Cette quantité est ensuite partagée entre consommation annuelle et investissement annuel dans chacun des deux secteurs (6.5). La somme des investissements sur toute la période constitue la première génération de capital à la période $t+1$ (6.6) alors que les générations de capital déjà existantes vieillissent toutes d'une période (6.7). Nous n'avons pas besoin d'exprimer la dépréciation du capital puisque, par les équations (6.6) et (6.7), la génération de capital la plus ancienne à la période t ($K_{n,ts}$) est automatiquement mise au rebut au début de la période $t+1$.

$$Y_t = F_t(K_{t1}, K_{t2}, L_t) \quad (6.4)$$

$$Y_t = C_t + I_{t1} \{1 + \phi_{t1}(\bar{\epsilon}_{t1} - \epsilon_{t1})\} + I_{t2} \{1 + \phi_{t2}(\bar{\epsilon}_{t2} - \epsilon_{t2})\} \quad (6.5)$$

$$K_{1,t+1,s} = \Delta \cdot I_{ts} \quad (6.6)$$

$$K_{v+1,t+1,s} = K_{v,t,s} \quad \text{pour } v \in \{1, \dots, n_s - 1\} \quad (6.7)$$

Nous traiterons un peu plus loin les fonctions d'abattement ϕ . Intéressons-nous pour le moment aux variables de commande de ce modèle macroéconomique. Un traitement complet du modèle de croissance voudrait que le taux d'épargne ainsi que la répartition de l'investissement entre les deux secteurs soient des variables de commande du modèle. Cependant, et contrairement au chapitre 1, nous ne nous proposons pas ici d'examiner l'impact sur le taux de croissance de l'économie d'une variation du « taux de préférence pure pour le présent ». En second lieu, la contrainte climatique peut en pratique être affrontée soit en conservant le taux d'épargne constant et en réduisant la productivité des investissements, soit en conservant le niveau d'investissements productifs constant tout en réduisant la consommation. C'est cette seconde alternative que nous retenons ici.

De ce fait, nous pouvons considérer que nous travaillons à la marge d'un scénario de croissance donné. En particulier, les quantités totales de capital dans chaque secteur et à chaque période peuvent être données de manière exogène. Nous imposons donc la contrainte (6.8) où $\bar{K}_{ts}$ représente la quantité de capital total dans chaque secteur dans la trajectoire de référence.

$$\sum_{v=1}^{n_s} K_{v,ts} = \bar{K}_{ts} \quad (6.8)$$

Notons que comme l'équation (6.8) s'applique à chaque secteur, elle interdit tout mécanisme de substitution entre secteurs dans la fonction de production. La pertinence de cette hypothèse dépend de la nature de la fonction de production agrégée et en particulier des possibilités de substitution entre les deux secteurs qu'elle autorise. Nous reviendrons sur cette question lorsque nous calibrerons le modèle.

L'équation (6.8) ne rigidifie cependant pas tout le système. Nous considérons en effet que la distribution du capital en générations peut changer par rapport à la trajectoire de référence. Elle constitue le second ensemble de variables de contrôle : le modèle peut alors surinvestir par rapport à la trajectoire de référence, mais il est alors forcé de remplacer de manière prématurée les générations les plus anciennes de façon à conserver la quantité totale de capital constante. De ce fait, les équations (6.7) ci-dessus sont remplacées par les inéquations suivantes :

$$K_{v+1,t+1,s} \leq K_{v,t,s} \quad \text{pour } v \in \{1, \dots, n_s - 1\} \quad (6.9)$$

Imposer la condition (6.8) a enfin une forte incidence sur la dynamique macroéconomique du modèle. Si la quantité totale de capital dans chaque secteur étant fixée à sa valeur de référence $\bar{K}_{ts}$, et si nous supposons la quantité de travail donnée de manière exogène, la production totale à chaque période est alors égale à sa valeur de référence $\bar{Y}_t$. Nous n'avons donc plus besoin de nous donner explicitement une fonction de production, mais simplement une trajectoire de production de référence. L'équation de

production (6.4) est automatiquement vérifiée, et la consommation à chaque période se déduit de (6.5) de la manière suivante :

$$C_t = \bar{Y}_t - I_{t1} \{1 + \phi_{t1}(\bar{\epsilon}_{t1} - \epsilon_{t1})\} - I_{t2} \{1 + \phi_{t2}(\bar{\epsilon}_{t2} - \epsilon_{t2})\} \quad (6.10)$$

2.2.3. Coûts d'abattement

Les fonctions ϕ qui apparaissent dans l'équation (6.10) représentent les coûts du « *leap frogging* », c'est-à-dire les coûts liés au fait d'aller chercher au-delà de la diminution tendancielle de l'indice d'émissions due au progrès technique autonome. Nous posons par convention $\phi_{ts} = 0$ si $\epsilon_{ts} = \bar{\epsilon}_{ts}$. Si par contre le capital produit est plus propre que celui disponible dans la trajectoire de référence, c'est-à-dire si ϵ_{ts} est inférieur à $\bar{\epsilon}_{ts}$, alors la $\phi_{ts}(\bar{\epsilon}_{ts} - \epsilon_{ts})$ est strictement positif. De fait, la quantité de bien composite nécessaire pour produire une unité de capital augmente, ce qui peut encore être interprété comme une diminution de la productivité marginale de l'investissement.

Les coûts des sauts technologiques sont supposés augmenter comme le carré de l'écart entre l'indice d'émissions souhaité et l'indice d'émissions de référence. Nous supposons néanmoins que le progrès technique autonome permet au cours du temps de réduire ce coût d'un facteur paramètre λ_{ts} . Nous obtenons ainsi l'équation suivante, où ϕ_s est un paramètre de calibration.

$$\phi_{ts}(\bar{\epsilon}_{ts} - \epsilon_{ts}) = \phi_s \left(1 - \frac{\epsilon_{ts}}{\bar{\epsilon}_{ts}}\right)^2 \lambda_{ts} \quad (6.11)$$

2.2.4. Module climatique

Nous reprenons le module climatique à la Nordhaus utilisé dans les chapitres 1 et 3. La variation de la concentration atmosphérique en CO_2 M_t est donc donnée à chaque instant par l'équation suivante :

$$M_{t+1} = M_t + \Delta_s [a_s (\sum_s E_{ts} + ED_t) - \delta (M_t - M_{\infty})] \quad (6.12)$$

La discussion sur les limites de ce modèle menée au chapitre 1 (section 2.2.1) reste bien entendu d'actualité.

2.2.5. Objectif du modèle

L'objectif de STARTS 2 est de minimiser la somme actualisée des coûts d'abattement²⁰ sur l'ensemble des périodes en utilisant à la fois la possibilité de « *leap frogging* » (variables ϵ_{ts}) et l'accélération de la rotation du capital (variables I_{ts}) pour à la fois maintenir d'un niveau de capital total égal à la référence dans chaque secteur (6.8) et ne pas dépasser le plafond de concentration en CO_2 (équation 6.14).

$$\text{Max}_{\epsilon_{ts}, I_{ts}} \quad W = \sum_t \frac{C_t}{(1+\rho)^{\Delta t}} \quad (6.13)$$

$$M_t \leq \bar{M} \quad (6.14)$$

²⁰ Nous faisons ici implicitement l'hypothèse selon laquelle le taux de croissance est constant et les coûts d'abattement restent faibles devant les niveaux de consommation à chaque période. Dans ce contexte, la minimisation de la somme actualisée des coûts d'abattements sous contrainte climatique conduit à une solution proche de celle qui aurait été obtenue par maximisation de la somme actualisée des utilités sous la même contrainte climatique.

2.3. Calibration du modèle : infrastructures de transport

Nous considérons deux secteurs « rigides » et « flexibles » caractérisés par des durées de vie du capital différentes. Chacun de ces secteurs recouvre en fait le stock de capital qui dirige la demande énergétique et l'offre énergétique correspondante.

- Le secteur « rigide » englobe les infrastructures de transport (routes, voies ferrées, aéroports, ports), et la part des planifications urbaines qui contraint la forme des villes et les besoins en transport urbains.
- Le secteur « flexible » à la fois l'habitat et l'industrie.

Nous rangeons l'habitat dans le secteur flexible dans le but d'isoler l'ensemble des infrastructures (voies de transport et formes urbaines) qui structurent la demande de mobilité. C'est en effet dans ce secteur que l'on trouve à la fois les durées de vie du capital les plus longues (bâtiment excepté) et des mécanismes auto-renforçants qui accroissent de manière importante l'inertie du système économique. Nous supposons bien entendu dans les simulations qui suivent que la structure des bâtiments n'est pas modifiée dans l'optique de réduire les émissions : les abattements dans l'habitat proviennent ainsi uniquement de changements dans les équipements « *end-use* ».

En termes de durée de vie du capital, nous supposons que le capital rigide a une durée de vie de 12 périodes (60 ans) alors que le capital flexible a une durée de vie de 5 périodes (25 ans). Compte tenu de la quantité de capital dans chacun des secteurs, la durée de vie moyenne du capital est donc à l'équilibre de 32 ans, ce qui correspond aux taux de dépréciation du capital moyen utilisé dans les modèles de croissance agrégés.

2.3.1. Trajectoire de croissance de référence

Nous construisons le modèle sur une période 2000-2200 par périodes de 5 ans. Le choix d'un horizon de calcul aussi long constitue un moyen empirique de limiter l'incidence des effets de bord sur le comportement du modèle entre 2000 et 2100, qui constitue notre période d'étude.

Nous utilisons pour scénario de référence le scénario IIASA A2 (Nakićenović *et al.*, 1998, IIASA & WEC, 1995). Le taux de croissance est donc de 2,5% par an de 2000 à 2200. Les émissions de CO₂ issues de la combustion des énergies fossiles passent de 7 GtC en 2000 à 15,1 GtC en 2050 et à 22,1 GtC en 2100. Nous supposons que cette valeur constitue un maximum et nous étendons ainsi le scénario IIASA A2 sur le XXII^e siècle en projetant une décroissance des émissions de référence jusqu'à 4 GtC par an en 2200. Les émissions non fossiles sont conformes au scénario retenu au chapitre 1.

Le travail de l'IIASA et du WEC présente l'intérêt de désagréger ses scénarios d'émissions de manière sectorielle. La part du secteur des transports dans les émissions totales est ainsi supposée passer de 25% aujourd'hui à 31% en 2100. La faible augmentation du secteur des transports s'explique par le fait que le scénario A2 est bâti autour d'une utilisation massive du pétrole puis du charbon pour la production d'électricité. Les technologies propres ne pénétrant que très marginalement dans un secteur énergétique dont l'activité est par ailleurs très importante, le niveau total des émissions est particulièrement élevé, et la part relative des transports n'augmente que marginalement.

2.3.2. Répartition sectorielle du capital

La répartition du capital entre secteurs est plus difficile à évaluer. Un changement dans le dessin des systèmes de transport affecterait en effet non seulement les infrastructures spécifiques au déplacement mais aussi la partie des infrastructures urbaines qui accompagnent les précédentes. En l'absence de données précises, nous adoptons l'hypothèse conventionnelle suivante : un tiers des investissements publics et privés dans le BTP sont sensibles à la forme des systèmes de transport. Les investissements

dans le domaine (strict) des transports représentant 5 à 7% des investissements totaux dans les pays de l'OCDE et, l'ensemble du BTP représentant environ 45% de ces mêmes investissements, nous obtenons un chiffre de 20% comme part du secteur rigide dans le capital total de l'économie.

D'un point de vue dynamique, nous considérons que la part du secteur rigide dans le stock de capital total reste constante bien que sa part dans les émissions augmente. Il s'agit là d'une hypothèse structurelle raisonnable, qui correspond au fait qu'il y ait peu de substitutions possibles entre secteurs dans la fonction de production. Le choix méthodologique consistant à conserver constant le capital total dans chacun des secteurs, et donc le ratio entre niveau de capital dans les deux secteurs, apparaît ainsi peu contraignant en première approximation²¹.

2.3.3. Distribution entre générations

Pour calibrer les générations de capital à l'instant initial (i.e. les paramètres $K_{v,t=1,s}$), nous supposons que l'économie se trouve sur une trajectoire de croissance équilibrée au taux de 2,5% par an. Les niveaux d'investissement dans chaque secteurs croissent en particulier à ce taux. Les quantités de capital par génération croissent donc à un taux constant. Il nous reste alors plus qu'à déterminer la quantité de capital présente dans une génération pour chaque secteur. Or nous connaissons le ratio capital flexible sur capital rigide. Si nous nous donnons d'autre part le niveau d'investissement total en 1990, via le niveau de production mondiale à cette période (choisi à 18 G\$ 90) et le taux d'épargne (20%), nous pouvons finalement calculer la distribution initiale du capital en générations. L'hypothèse d'un taux de croissance constant et d'un partage constant du capital entre secteur rigide et secteur flexible nous permet ensuite de calculer itérativement la composition du capital en générations à chaque période future.

Le choix de calibrer les générations de capital non pas sur des chroniques d'investissement passés dans les deux secteurs, mais sur une économie virtuellement équilibrée ne traduit pas uniquement la difficulté de recueillir, de traduire et d'analyser des séries statistiques au niveau mondial pour une période s'étendant de 1940 à 2000. Ce choix nous permet aussi d'examiner de manière « clinique » l'incidence de la politique climatique sur la dynamique du capital, et en particulier les phénomènes d'accélération du capital. Si nous avions utilisées des données statistiques réelles, nous aurions en effet généré une distribution initiale du capital irrégulière qui aurait entraîné des chocs sur la distribution future du capital. Eliminer ces chocs en nous ramenant à une distribution « lisse » du capital nous permet d'isoler l'influence de la contrainte climatique sur la distribution du capital²².

2.3.4. Indices d'émissions de référence

Nous calibrons les indices d'émissions du capital installé avant 2000 en supposant que l'indice d'émissions par unité de capital a diminué à un taux constant jusqu'en 2000. Connaissant le niveau d'investissement à chaque période ainsi que le niveau d'émissions, nous pouvons alors calculer itérativement les indices d'émissions $\bar{\epsilon}_{is}$. Les indices d'émissions ainsi obtenus présentent cependant de petites irrégularités. Nous approximations ces valeurs par une fonction polynomiale d'ordre 4. Nous obtenons ainsi des indices d'émissions lissés (figure 6.1). Nous recalculons enfin les émissions de telle sorte qu'elles correspondent à ces nouveaux indices.

²¹ Les hypothèses formulées sur la structure du capital devraient être précisées par des études empiriques plus fines. Ce calibrage sera de toute manière plus facile lorsque nous disposerons d'un modèle à 4 ou 5 secteurs dont les contours seront plus en phase avec les découpages sectoriels classiquement utilisés dans la littérature.

²² Il serait par contre intéressant d'examiner empiriquement dans quelle mesure de tels « chocs » sont possibles. S'il est en effet nécessaire à une période future donnée d'investir massivement pour remplacer une quantité importante de capital qui viendrait au même moment au rebut, les marges de manœuvre pour la mise en œuvre d'une politique climatique sont alors réduites. Ce sera en particulier le cas en France lorsqu'il faudra remplacer les centrales nucléaires qui arriveront en fin de vie dans un laps de temps très court.

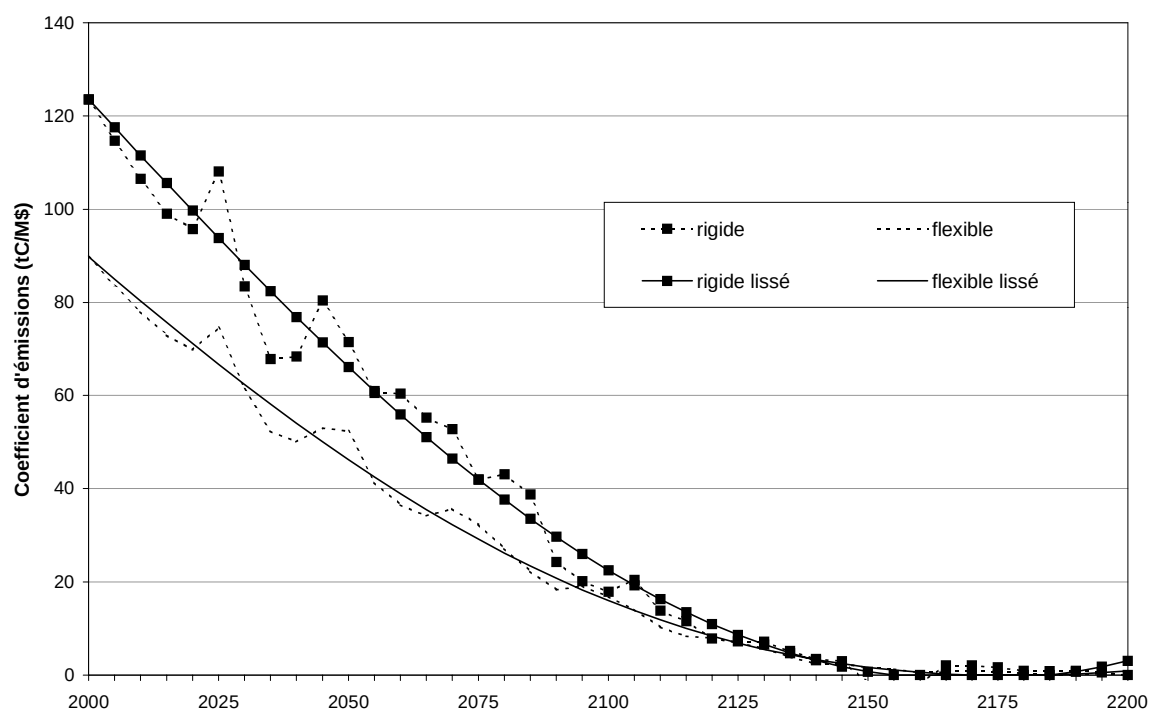


Figure 6.1 : Coefficients d'émissions par unité de capital avant lissage (trait pointillé) et après lissage (trait plein) en tC par millions de dollars 90. Les courbes correspondant au secteur rigide sont représentées avec des carrés noirs. Les courbes après lissages sont en traits pleins.

2.3.5. Fonctions de coûts de réduction des émissions

Les fonctions de coûts du « *leap frogging* » sont calibrées de telle sorte que les coûts d'une stabilisation des émissions à 550 ppm faisant appel uniquement à des technologies moins émettrices (et pas à une rotation accélérée du capital) soient de 1% de la consommation totale actualisée. Ces fonctions dépendent des coûts d'une hypothétique technologie totalement non carbonée (paramètres ϕ_s) qui sont supposés décroître avec le temps (paramètres de progrès technique autonome λ_{ts}). Une telle calibration est cependant plus difficile dans un modèle à deux secteurs dans la mesure où elle requiert des hypothèses sur deux technologies « *backstop* » différentes.

Dans les simulations numériques qui suivent, nous supposons que les coûts de réduction des émissions sont plus élevés dans le secteur rigide que dans le secteur flexible. En effet, selon les experts, la technologie « *backstop* » dans le premier secteur proviendra probablement de l'électricité ou des piles à combustible, ce qui requiert une étape supplémentaire entre l'énergie primaire et le service final à l'utilisateur, ou des biocarburants, dont les coûts totaux doivent inclure les effets induits sur l'usage des sols, la production de nourriture et le coût de stockage des déchets. Enfin, dans la mesure où tous les scénarios sont construits sur des hypothèses en matière de formes urbaines, le basculement modal vers le fluvial ou le ferroviaire est supposé être très intensif en capital²³.

Pour les mêmes raisons, nous supposons que le progrès technique autonome est plus rapide dans le secteur flexible (1% par an) que dans le secteur rigide (0,25%) dans la mesure où le second dépend en fait du premier. Nous choisissons ainsi finalement $\phi_R = 1$, $\phi_F = 0,5$, $\lambda_{tR} = 0,25 + 0,75.e^{-0,0025.\Delta}$ et $\lambda_{tF} = 0,25 + 0,75.e^{-0,01.\Delta}$.

²³ Il est bien certes possible d'imaginer des politiques de long terme qui génèrent des formes urbaines et des coûts du transport qui ne soient pas, tous comptes faits, plus chers que les systèmes étudiés. Mais ceci revient à construire une nouvelle trajectoire de référence dans STARTS.

Le modèle STARTS est codé sous le langage GAMS (code à l'annexe 3) et résolu par les solveurs non linéaires GAMS/MINOS et GAMS/CONOPT. L'optimisation a lieu sur 41 périodes de 5 ans entre 1990 et 2200 afin de minimiser la propagation des effets de bord sur l'horizon d'étude du modèle.

(6.13)	$\text{Max}_{\varepsilon_{ts}, I_{ts}} \quad W = \sum_{t=1}^T \frac{C_t}{(1+\rho)^{\Delta t}}$	<i>Objectif de Maximisation</i>
(6.10)	$C_t = \bar{Y}_t - I_{t1} \{1 + \phi_{t1}(\bar{\varepsilon}_{t1} - \varepsilon_{t1})\} - I_{t2} \{1 + \phi_{t2}(\bar{\varepsilon}_{t2} - \varepsilon_{t2})\}$	<i>Répartition de la production entre consommation et investissement</i>
(6.6)	$K_{1,t+1,s} = \Delta \cdot I_{ts}$	<i>Formation de la nouvelle génération de capital à partir de l'investissement</i>
(6.9)	$K_{v+1,t+1,s} \leq K_{v,t,s}$	<i>Evolution des générations de capital dans le temps</i>
(6.11)	$\phi_{ts}(\bar{\varepsilon}_{ts} - \varepsilon_{ts}) = \phi_s \cdot (1 - \frac{\varepsilon_{ts}}{\bar{\varepsilon}_{ts}})^2 \cdot \lambda_{ts}$	<i>Coûts de « leap-frogging »</i>
(6.2)	$E_{ts} = \sum_{v=1}^{n_s} K_{v,ts} \cdot \varepsilon_{t-v,s}$	<i>Emissions de CO₂ fossiles</i>
(6.12)	$M_{t+1} = M_t + \Delta \cdot [a \cdot (\sum_s E_{ts} + ED_t) - \delta (M_t - M_{-\infty})]$	<i>Dynamique d'accumulation du CO₂ atmosphérique</i>
(6.8)	$\sum_{v=1}^{n_s} K_{v,ts} = \bar{K}_{ts}$	<i>Quantité totale de capital par secteur constante</i>
(6.14)	$M_t \leq \bar{M}$	<i>Contrainte environnementale</i>

Tableau 6.2 : Présentation synthétique des équations du modèle STARTS 2.

C_t	Consommation	variable (10^{12} \$90/an)
I_{ts}	Investissement	variable (10^{12} \$90/an)
$\bar{Y}_t$	Production totale	$\bar{Y}_t = 23 \cdot e^{0,025 \cdot \Delta \cdot t}$ (10^{12} \$90/an)
ρ	Taux d'actualisation	5%
ε_{ts}	Indice d'émissions par unité de capital	variable ($tC/10^6$ \$90)
K_{vts}	Quantité de capital de la génération v	variable (10^6 \$90/an)
$\bar{K}_{ts}$	Quantité totale de capital par secteur de référence	calibré par le modèle (10^6 \$90/an)
$\bar{\varepsilon}_{ts}$	Indice d'émissions par unité de capital de référence	paramètre calibré ($tC/10^6$ \$90)
ϕ_s	Coûts de la technologie sans carbone	$\phi_R=1, \phi_F=0,5$
Δ	Durée d'une période	5 ans
λ_{ts}	Progrès technique autonome	$\lambda_{tR} = 0,25 + 0,75 \cdot e^{-0,025 \cdot \Delta \cdot t}$ $\lambda_{tR} = 0,25 + 0,75 \cdot e^{-0,025 \cdot \Delta \cdot t}$
n_s	Durée de vie du capital par secteur	$n_R=12$ périodes, $n_F=5$ périodes
T	Nombre total de périodes	41
E_{ts}	Emissions de CO ₂ fossiles	variable (GtC/an)
a	Taux d'absorption des émissions par l'atmosphère	0,38 ppm/GtC/an
b	Taux de « fuite » du CO ₂ vers l'océan	0,01 an ⁻¹
M_t	Concentration atmosphérique en CO ₂	variable (ppm)
$\bar{M}$	Plafond de concentration	450, 550 ou 650 ppm
M_0	Concentration en CO ₂ 1990	356 ppm
$M_{-\infty}$	Concentration préindustrielle en CO ₂	278 ppm

Tableau 6.3 : Présentation synthétique des variables et des paramètres du modèle STARTS 2.

2.4. Simulations numériques

2.4.1. Trajectoires optimales de réduction des émissions sectorielles

Dans cette sous-section, nous examinons la réponse optimale à une contrainte déterministe sur la concentration atmosphérique en CO₂. Les plafonds considérés sont 450, 550 et 650 ppm (nous nommons dans la suite ces simulations C450, C550 et C650).

La figure 6.2 montre les pourcentages de réduction des émissions optimales dans chaque secteur dans le cas C550. Les courbes sont assez rapprochées jusqu'en 2045, date à partir de laquelle les taux d'abattement se mettent à augmenter plus rapidement dans le secteur flexible que dans le secteur rigide : en 2045, les taux d'abattement sont de 15% dans le secteur rigide et de 16% dans le secteur flexible, contre 42% et 72% respectivement en 2080²⁴.

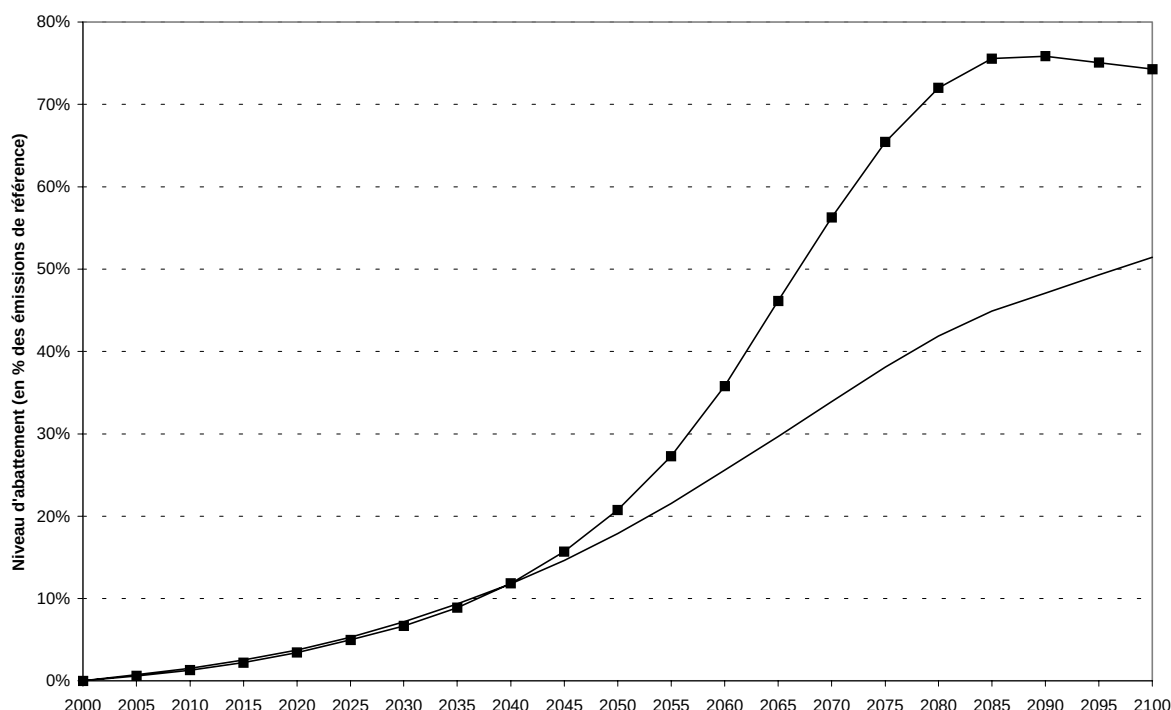


Figure 6.2 : Trajectoires optimales de réduction des émissions pour une cible de 550 ppm. Le secteur flexible est indiqué par des carrés noirs.

Par contre, les coûts de réduction des émissions (mesurés en pourcentages de diminution de la consommation de référence totale) s'avèrent très différents selon les secteurs (figure 6.3). Ces coûts restent comparables dans les toutes premières périodes (0,16% de la consommation en 2020 dans le secteur flexible contre 0,11% dans le secteur rigide) mais divergent rapidement après cette date. L'écart le plus important est enregistré lorsque les deux courbes de coûts atteignent simultanément leur valeur maximale : 78% de la perte d'utilité provient alors du secteur flexible.

Nous retrouvons ici la forme de « pic » de la trajectoire des coûts de réduction des émissions, conséquence directe de la loi du mouvement de notre modèle. L'abattement optimal résulte en effet de l'interaction entre deux ensemble de forces contradictoires : le changement technique autonome et l'actualisation rendent plus intéressante une actualisation tardive, alors que les effets d'irréversibilité et les risques de pénalité d'accélération poussent à une action rapprochée. La majeure partie des efforts

²⁴ Dans les cas C450 et C650; les distributions relatives des niveaux d'abattement sont identiques. La différence principale est la pente des différentes courbes et la date à partir de laquelle le secteur flexible se met à réduire ses émissions plus rapidement que le secteur rigide.

de réduction des émissions sont alors déclenchés lorsque les coûts d'abattement deviennent dominés par la pénalité d'accélération.

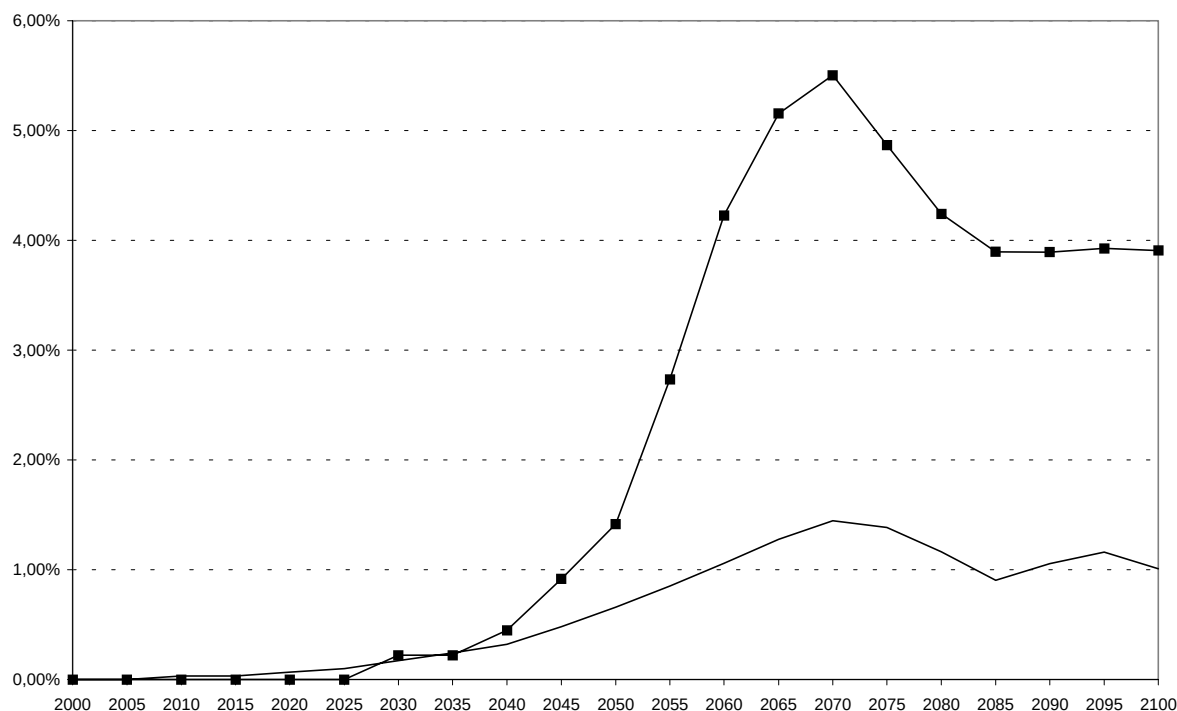


Figure 6.3 : Coûts d'abattement optimaux (exprimés en pourcentage de la consommation totale de référence) pour une cible de 550 ppm. Le secteur flexible est indiqué par des carrés noirs.

Il est intéressant de noter qu'avec les hypothèses retenues, le modèle n'accélère pas la rotation du capital pour une cible à 550 ou à 650 ppm. Pour une cible à 450 ppm par contre, le modèle accélère dans le secteur rigide en 2040 : il augmente alors son investissement de 55% par rapport à la trajectoire de référence, ce qui le conduit à éliminer mettre au rebut deux générations de capital encore productives.

2.4.2. Impacts différentiels de l'incertitude dans un monde avec des stocks de capital hétérogènes

Ce qui importe du point de vue des politiques publiques est de comprendre comment l'incertitude peut affecter la distribution des coûts entre secteurs. C'est pourquoi nous analysons dans un premier temps la trajectoire de réduction des émissions stochastique optimale, puis les conséquences d'un retard de 20 ans dans le démarrage de l'action et enfin les conséquences d'une sous-estimation du taux de croissance des besoins en transport.

a) Trajectoire d'émissions optimale lorsque la contrainte est incertaine

Nous représentons maintenant le problème de décision sous risque. Comme nous l'avons développé au chapitre 3, nous supposons que le plafond de concentration qui évite des dommages trop importants n'est connu qu'à partir d'une date future donnée, ici 2025. Avant cette date, nous disposons simplement d'un jeu de probabilités subjectives que le bon plafond de concentration soit de 450, 550 ou 650 ppm. Nous utilisons ici la distribution de probabilité *a priori* (1/3, 1/3, 1/3).

Les courbes d'émissions obtenues sont représentées sur la figure 6.4. La trajectoire de réduction optimale d'ici à 2025 nécessaire pour viser une cible 550 incertaine est plus basse que la trajectoire

certaines correspondantes à la même cible. La raison est en que les coûts d'une action trop rapide si la cible s'avère finalement être 650 ppm sont plus que compensés par les coûts d'une accélération dans le cas où la cible finale serait 450 ppm. Le pourcentage de réduction des émissions globale passe ainsi de 4% à 14% en 2020. Nous retrouvons ici les mêmes ordres de grandeur numériques que ceux obtenus par Ha-Duong *et al.* (1997). Si, du fait de l'effet volume, la majeure partie de ces réductions d'émissions proviennent du secteur flexible, l'effort relatif des deux secteurs exprimé en pourcentage de réduction des émissions est du même ordre de grandeur à 10% dans le secteur rigide contre 16% dans le secteur flexible.

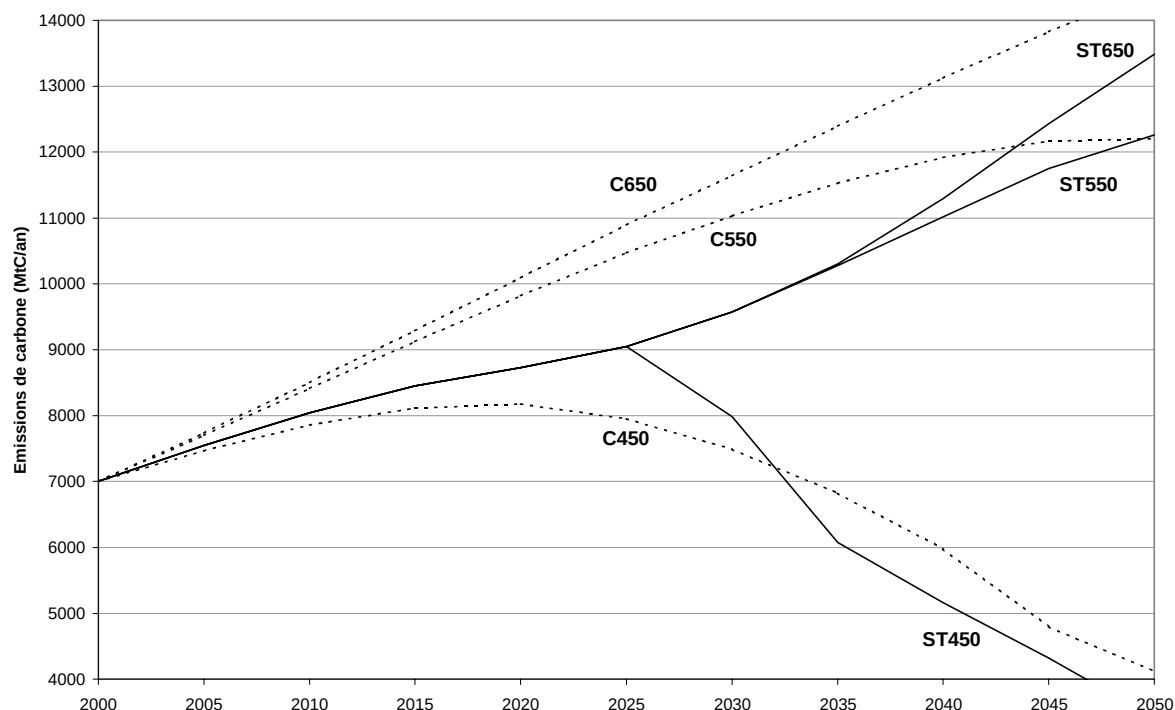


Figure 6.4 : Trajectoires d'émissions optimales (MtC/an) soit en optimisant une fois pour toute dès 2000 (trajectoires C650, C550 et C450 en trait pointillé) ou en décision séquentielle (ST650, ST550, ST450).

b) Coûts d'un retard de 20 ans

Dans le scénario retardé (D), les politiques de réduction des émissions sont supposées ne prendre effet qu'à partir de 2020. La figure 6.5 montre que les niveaux de réduction des émissions dans chacun des secteurs dans les cas C550 et D550 ne diffèrent que très peu. Les coûts d'abattement ne diffèrent pas non plus beaucoup, ce qui confirme les résultats de HGH (le coût total actualisé passe de 1% à 1,03% de la consommation totale actualisée). Si nous nous intéressons maintenant aux profils de réduction des émissions, la trajectoire (D) reste sous la trajectoire (C) jusqu'en 2040 (secteur flexible) et 2075 (secteur rigide) avant de passer au dessus (avec un écart maximal de 9% observé dans le secteur flexible en 2055).

Lorsque le plafond est de 450 ppm par contre (figure 6.6), des différences importantes apparaissent entre les scénarios C et D : le secteur flexible doit en effet assumer un abattement très important, qui atteint 85% en 2045. L'explication de cette trajectoire abrupte se trouve dans le fait que nous avons atteint une limite physique : atteindre une concentration de 450 ppm en ne commençant qu'en 2020 requiert d'augmenter les économies de carbone de 380 MtC supplémentaires *par an* entre 2020 et 2040, ce qui représente un effort deux fois plus rapide que dans le profil d'abattelements C450.

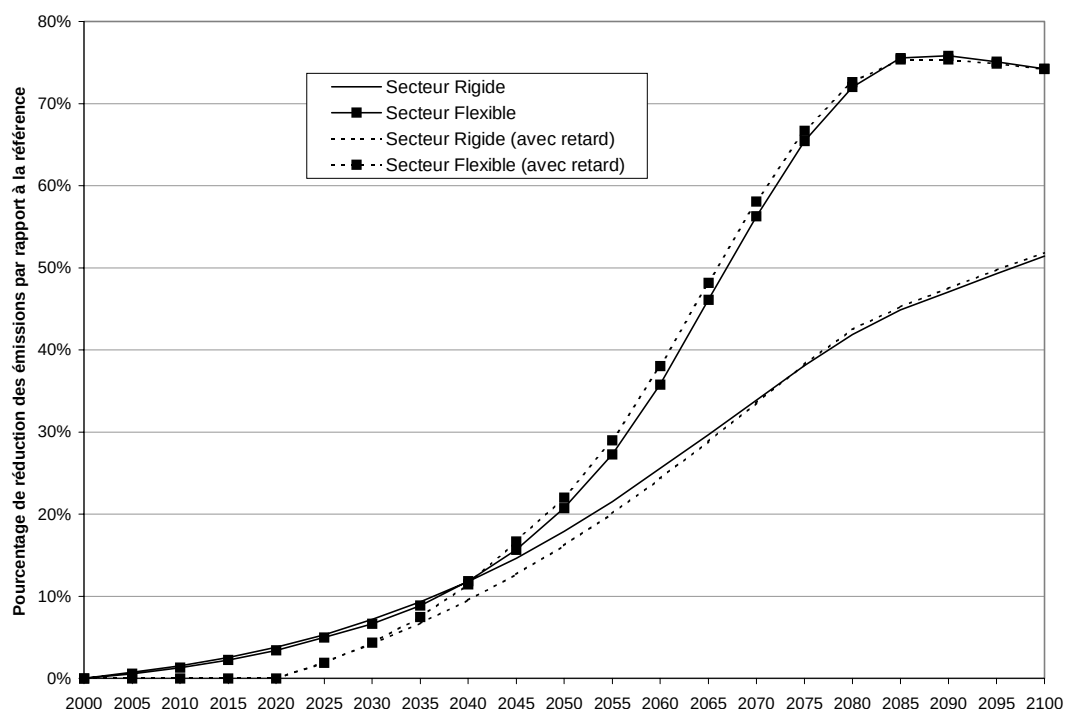


Figure 6.5 : Niveaux de réduction des émissions dans chacun des secteurs pour une cible à 550 ppm avec et sans retard de 20 ans de l'action. Les trajectoires marquées avec des carrés noirs représentent le secteur flexible. Les courbes en pointillés représentent le cas avec retard.

Ces résultats soulignent la non-linéarité de la réponse à la valeur de la concentration. Dans les cas C450 et C550 subsistait encore une marge de manœuvre pour éviter ou tout au moins limiter l'impact de l'accélération. Dans le cas D par contre, cette marge est réduite et l'inertie devient critique. D'où le fait que, dans les scénarios D450 et D550, le secteur flexible porte la majeure partie du fardeau additionnel.

L'évolution des profils d'abattement entre C et D est transposée mécaniquement en termes de coûts. Les coûts totaux actualisés augmentent très significativement de 3,6% de la consommation actualisée totale (cas C450) à 4,5% (cas D450). Le déplacement du pic de coûts est encore plus impressionnant : il passe de 6% en 2040 dans le scénario C450 à 15% en 2035 dans le scénario D450. De tels chiffres posent évidemment la question du réalisme d'une telle cible en concentration dès lors que l'on est seulement raisonnablement optimiste sur le progrès technique comme nous le sommes ici. Il est important de noter qu'en 2035, 84% des coûts dans le secteur flexible sont liés au renouvellement accéléré du capital.

Notons que la distribution temporelle des investissements nous montre aussi une propagation des investissements supplémentaires : le déplacement d'un investissement de la période $t+1$ à la période t entraîne en effet un nouvel investissement anticipé à la fin de la durée de vie des équipements, c'est-à-dire à la date $t+n_s$.

En outre, cet exercice nous permet de souligner combien il peut être trompeur de ne s'intéresser qu'à des valeurs agrégées. Passer de C450 à D450 entraîne en effet une augmentation des coûts globaux de 25%, ce qui est déjà considérable, mais ce chiffre agrégé dissimule des coûts sectoriels beaucoup plus importants, qui sont porteurs des conséquences très lourdes sur le fonctionnement de l'économie.

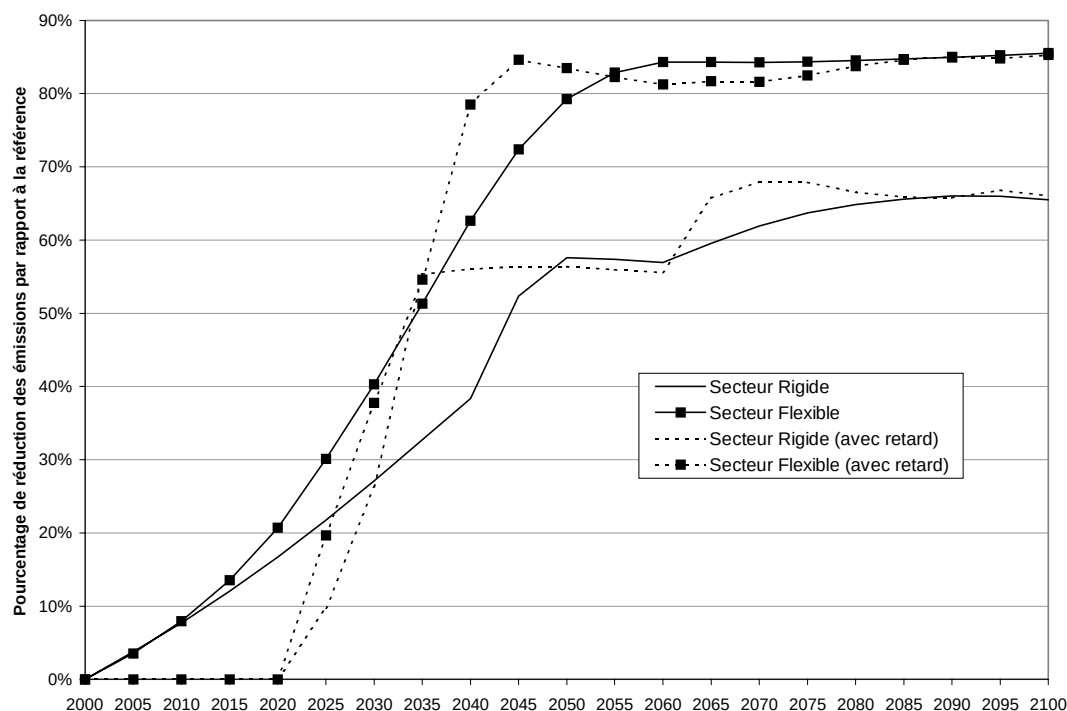


Figure 6.6 : Niveaux de réduction des émissions dans chacun des secteurs pour une cible à 450 ppm avec et sans retard de 20 ans de l'action. Les trajectoires marquées avec des carrés noirs représentent le secteur flexible. Les courbes en pointillés représentent le cas avec retard.

2.4.3. Discussion

Les expériences numériques présentées dans cette section débouchent sur deux résultats assez intuitifs. En premier lieu, il est optimal de commencer l'action rapidement dans les secteurs les plus inertes. En second lieu, en cas d'action retardée ou de sous-estimation de la croissance de ces secteurs, les coûts additionnels sont principalement supportés par le secteur flexible. En outre, et de manière peut être moins immédiate, le modèle STARTS 2 montre que le choc sur le secteur flexible s'avère rapidement très important, suggérant que l'effet de l'inertie du capital sur les coûts l'emporte, au moins à court et moyen termes, sur l'effet du progrès technique. En découlent trois implications majeures en termes de politiques publiques.

En premier lieu, ce résultat souligne le fait, déjà apparent dans la controverse entre Wigley *et al.* (1996) et Ha-Duong *et al.* (1997), que le niveau d'abattement agrégé n'est pas une mesure correcte de la pertinence ou de la non de l'action. En effet, un pays qui répondrait à ses engagements internationaux en réduisant ses émissions industrielles ou en installant des appareils électriques moins consommateurs sans toucher aux trajectoires de croissance dans les secteurs les plus rigides, et en particulier dans le domaine des transports pourrait ainsi être entraîné dans une stratégie très sous-optimale.

En second lieu, les règles d'allocation des quotas d'émissions entre pays au-delà de la première période budgétaire de 2008-2012 prévue par le Protocole de Kyoto, et les règles d'attribution des quotas d'émissions aux pays en voie de développement qui rejoindraient l'Annexe I après cette date, ne devraient pas être uniquement fondées sur des chiffres agrégés, mais prendre en compte la part relative des secteurs des transports et du BTP dans les émissions.

En troisième lieu, ces simulations conduisent à nous interroger sur la capacité d'un marché de permis d'émissions négociables de déclencher à temps les réductions d'émissions dans les secteurs les plus rigides. En effet, en l'absence de mesures structurelles d'accompagnement dans le domaine de la planification urbaine ou dans les transports, il est probable qu'un prix des permis faible sur les

premières périodes ne sera pas en mesure de générer un infléchissement significatif des courbes d'émissions dans ces domaines. Or, si dans un second temps le prix des permis augmente de manière drastique, l'industrie sera alors forcée de supporter l'ensemble du choc. Ce point est d'autant plus important que nous n'avons considéré dans notre modèle que l'inertie liée à la durée de vie des équipements, et que nous avons passé sous silence les dynamiques auto-renforçantes qui pourraient limiter encore plus la réaction du secteur rigide à un signal prix faible.

Ces analyses restent cependant préliminaires, en particulier du fait de l'agrégation en deux secteurs qu'elles proposent. Des travaux plus désagrégés sont nécessaires pour comprendre comment un système de permis d'émissions négociables est susceptible de fonctionner dans un monde au stock de capital très hétérogène, et quelles sont les mesures d'accompagnement nécessaires pour réduire l'écart entre le signal prix de court terme et les adaptations techniques dans les secteurs dans lesquels les prix de l'énergie ne sont pas le moteur dominant des comportements et des choix publics.

Conclusion

A la rhétorique de l'actualisation, nous avons maintenant substitué une vision enrichie du rapport court terme / long terme qui met au cœur du débat la tension entre incertitudes sur le changement climatique et nature de l'héritage que nous laissons à nos enfants :

- Du fait de l'incertitude sur les comportements de nos descendants, il est illusoire de vouloir imposer un niveau de concentration atmosphérique en GES à long terme. Le seul point de repère tangible dont nous disposons est de conduire des politiques climatiques telles que nos enfants soient placés au mieux pour répondre au risque climatique, au moins tel que nous l'envisageons aujourd'hui.
- Du fait de l'incertitude sur les coûts et les dommages du changement climatique, ce qui compte dans l'héritage que nous leur transmettons n'est pas seulement le niveau de richesse ou le niveau d'émissions que nous leur laissons, mais aussi le degré de flexibilité que nous leur transmettons. Pour employer une métaphore mathématique : non seulement l'état de l'économie x et l'état de l'environnement e comptent, mais les dynamiques $\dot{x}$, $\dot{e}$ et $\partial x / \partial e$, soient respectivement les dynamiques de croissance, d'émissions et les coûts marginaux d'abattement important elles-aussi.

Ce changement de point de vue nous oblige à dépasser les grandeurs agrégées pour entrer dans la description plus fine des systèmes techniques. Nous avons ainsi rencontré deux éléments qui concourent à la plus ou moins grande flexibilité que nous transmettons à nos descendants. La durée de vie du capital des équipements constitue une première source de rigidité, dans la mesure où toute réduction rapide des émissions peut demander de procéder à une mise au rebut anticipée des équipements et donc à des investissements très importants à une période donnée. Le modèle STARTS 2 que nous avons développé dans la seconde partie nous a montré que les coûts d'un retard de l'action pouvaient alors se révéler très élevés. En second lieu, les dynamiques auto-renforçantes telles que les rendements d'échelle croissants ou les mécanismes d'apprentissage conduisent les marchés à renforcer spontanément le premier choix au-delà d'une certaine limite. L'arbitrage entre dictature du présent et dictature du futur se révèle ainsi irréductible à un seul coefficient, et nécessite au contraire un examen détaillé du contenu de ce que nous transmettons.

Second Entracte

L'incertitude radicale sur les déterminants du problème climatique comme sur les comportements de nos descendants nous a conduit à passer d'une discussion sur la distribution intergénérationnelle des coûts des politiques climatiques à un débat sur la nature de l'héritage. Ce changement de perspective impose de décrire de manière plus fine la tension entre la nature du legs, et en particulier la flexibilité ou au contraire l'inertie que nous transmettons à nos descendants dans chaque secteur économique d'une part, et les incertitudes de long terme qui pèsent sur les termes du problème climatique d'autre part.

Cependant, la valeur des paramètres qui comptent pour cette description, taux d'actualisation certes, mais aussi valeur d'option ou valeur de l'information, se révèle dépendante des anticipations que nous formulons sur la trajectoire économique future :

- L'effet richesse, première composante du taux d'actualisation, est directement relié au taux de croissance économique futur.
- Nous avons vu que le « taux de préférence pure pour le présent », que nous avons rebaptisé « taux de préférence pour le non sacrifice du présent », ne peut être pensé sans faire référence au taux d'épargne, et donc à nouveau au scénario de croissance à long terme.
- Par ailleurs, nous avons observé que toute évaluation de la flexibilité que nous transmettons à nos descendants dépend directement des anticipations sur les émissions et sur les coûts d'abattement à long terme, lesquelles anticipations dépendent à leur tour du contenu de la croissance future.

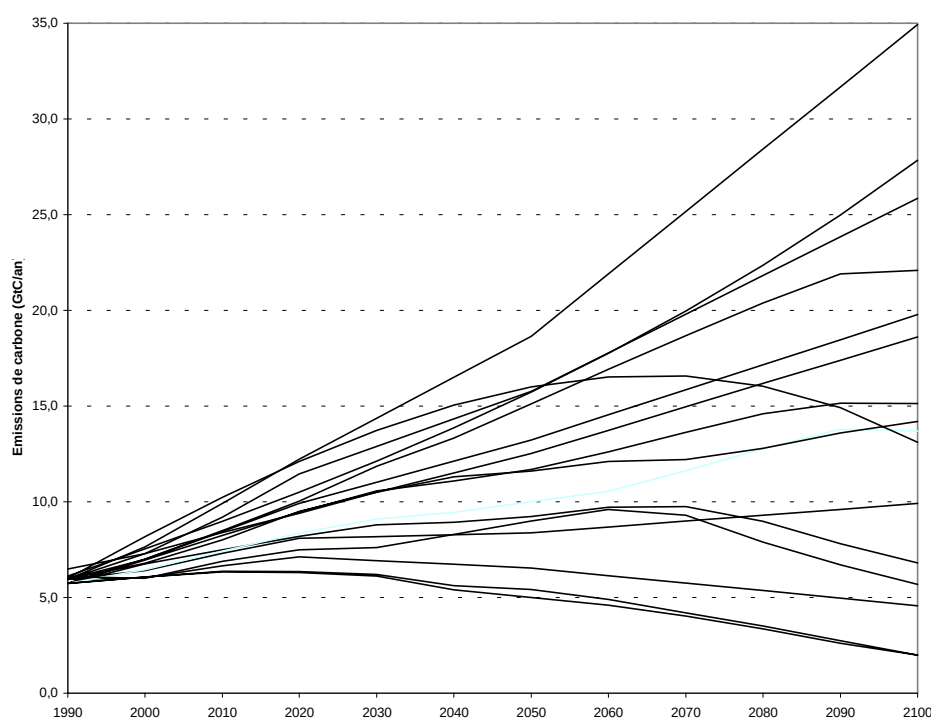
De fait, il n'est pas surprenant de constater que les incertitudes sur la trajectoire de référence ont un impact très important sur les évaluations des politiques climatiques. Elles apparaissent même comme le déterminant essentiel de ces évaluations. De fait, si l'incertitude nous a imposé d'élargir ainsi le champ du débat court terme/long terme, ce changement de perspective ne nous permet pas pour autant de réduire cette incertitude.

Pour sortir de cette impasse, Martin Weitzman (1998) propose de raisonner en espérance d'utilité par rapport aux scénarios de croissance à long terme. Son idée est donc de d'affecter à chaque scénario de croissance possible une probabilité subjective d'occurrence, puis de calculer la politique climatique qui maximise l'utilité espérée contre cette distribution de probabilités. Or nous constatons que, plus le calcul est poussé à long terme, plus le poids du scénario dont le taux de croissance est le plus faible devient important. Le facteur d'utilité qui lui est attaché devient en effet très important relativement aux autres¹. Weitzman en conclut qu'à très long terme, nous sommes fondés à utiliser un taux d'actualisation correspondant au scénario dans lequel la croissance est la plus faible.

Ce raisonnement n'est cependant valable que dans la mesure où les probabilités d'occurrence des différents états du monde futurs, ici les taux de croissance, sont indépendantes des décisions prises aujourd'hui. Or la croissance à long terme dépend certes de « données de la nature » comme la taille des réserves de ressources non renouvelables, ou les limites physiques du progrès technique, mais il nous semble raisonnable de considérer qu'elle découle aussi pour partie de nos décisions et de leur chronologie. Si nous acceptons cette hypothèse, alors le raisonnement de Weitzmann débouche sur un paradoxe : le choix d'un taux d'actualisation faible aujourd'hui contribue à augmenter la quantité d'investissements à très long terme, ce qui conduit à augmenter la quantité de capital que nous transmettons. Par conséquent, la probabilité d'occurrence des scénarios dans lesquels le taux de croissance à long terme est élevé augmente, ce qui aboutit à délégitimer *ex post* la décision prise *ex ante*.

¹ Nous avons retrouvé au chapitre 3 (section 2.4) un résultat numérique similaire.

Il convient de rester très prudent quant à cette analyse littéraire du papier de Weitzman. Ces considérations demandent en effet à être étayées analytiquement. Nous retrouvons néanmoins ici un paradoxe très général déjà souligné par Gabriel Dessus en 1949 : le résultat du calcul économique dépend du contexte économique à long terme, mais contribue à transformer ce contexte. Nous reprenons ici la formulation qu'en donne Jean-Charles Hourcade (1990a) : « *[Le calcul économique] procède par nécessité d'une construction a priori du futur, les coûts étant des indicateurs de tension entre hypothèses « controversables » et réalité présente. Le processus qui mène à l'irréversibilité d'un sentier technique [...] intervient dès lors que l'on oublie que le calcul économique est intrinsèquement paradoxal : on s'y trouve toujours en situation de boucle entre des niveaux logiques hiérarchiquement distincts, quand le choix à l'intérieur d'un contexte décisionnel produit ce contexte.* » (p.293). Le dessin de Escher qui orne la couverture de l'ouvrage dont est extrait cette citation ne pouvait trouver meilleure illustration.



Emissions de CO₂ fossiles pour 16 scénarios de référence entre 1990 et 2100 en GtC par an (Sources : Nakićenović et al., 1998, Morita et Lee, 1997, Leggett et al., 1992).

Nous sommes donc conduits à nous interroger sur le statut du calcul économique dans un contexte de décision sous controverses dans lequel le calcul économique est subordonné à la prospective sur les différents états du monde possibles (Hourcade, 1991, Godard, 1993). Comment faire en sorte que le calcul économique puisse rester un « langage de négociation », selon le mot de Claude Henry, dans un contexte aussi incertain ? Le risque est grand de voir les différents discours immédiatement disqualifiés par l'incertitude qui pèse sur les modèles. Pour reprendre le mot de Jeffrey Frankel, « *We all face a common foe : the suspicion among non economists that models are of little use because they all say different things. The feeling is that the results vary widely and that the differences depend [only] on the policy preferences of the modeler* » (1998, p.6).

De ce point de vue, la lecture des principaux scénarios d'émissions possibles à l'horizon 2100 n'incite pas véritablement à l'optimisme. Ces scénarios, proposés par le GIEC ou par l'IIASA et le WEC², sont cependant tout le contraire de projections hâtives. Ils résument au contraire plusieurs années de travail de recherche à l'échelle internationale entre des équipes disposant à la fois d'un accès très large aux

² International Institute for Applied System Analysis et World Energy Council.

données et d'outils méthodologiques très pointus. Mais l'aspect « plat de spaghettis » de la figure ci-contre fait largement oublier l'ampleur de ce travail sous-jacent.

Devant la complexité des futurs possibles et la difficulté de prendre une décision collective sous controverses, la solution la plus couramment adoptée consiste à s'accorder sur des règles d'action très simples. Dans le cas du changement climatique, la discussion sur le futur l'élargissement de l'annexe B aux pays en voie de développement passe ainsi par la recherche de règles d'allocation des quotas d'émissions entre ces différents pays. L'objet de cette troisième partie est précisément d'examiner dans quelle mesure une discussion sur les règles permet ou non de limiter l'impact de l'incertitude sur la trajectoire de référence, tout en évitant le triple risque mis en avant par Hourcade (1991) :

- *« la préemption du long terme par le présent : dans l'attente de certitudes plus fermes, on prolonge les comportements actuels qui mettent en péril la « soutenabilité » du développement.*
- *La capture du présent par le futur : en raison d'une image arbitraire du futur et de ses dangers, on impose un projet au nom de l'intérêt collectif [...].*
- *la paralysie entraînée par la multiplication de ce que l'on appellera avec Philippe Roqueplo « des perceptions de risque inversé » : en utilisant les risques globaux d'environnement dans des stratégies particulières on s'engage dans des controverses infinies qui empêchent de former le consensus minimal préalable à toute action » (Hourcade, 1991, pp.81-82).*

Un tel programme nous oblige à nous aventurer sur le terrain de la prospective. Pour ce faire, nous adopterons ici une démarche prudente consistant à utiliser des modèles économiques simples pour mettre en évidence l'impact de l'incertitude sur le scénario de croissance. Nous consacrerons le chapitre 7 à la présentation des enjeux de l'élargissement de l'annexe B, et à un examen plus approfondi de la diversité des scénarios de croissance futurs en compétition. Nous évaluerons au chapitre 8 la robustesse des différentes règles d'élargissement de l'annexe B présentées dans la littérature par rapport aux incertitudes sur le scénario de croissance. Ayant conclu de manière pour le moins nuancée sur la capacité d'une coordination par les règles à surmonter l'obstacle que constitue l'incertitude, nous serons conduits à nous interroger au chapitre 9 sur la signification et l'usage des modèles numériques dans un monde dans lequel les résultats du calcul économique sont subordonnés à la vision du monde futur dans laquelle ils s'inscrivent. Nous déboucherons finalement sur une réflexion de nature institutionnelle sur la manière de rendre le cadre du Protocole de Kyoto un peu plus robuste à l'incertitude.

Troisième Partie

**Où la modélisation économique rejoint
la réflexion institutionnelle**

Chapitre 7 Le protocole de Kyoto au défi du long terme

Conformément aux engagements pris à Rio puis à Berlin, le protocole de Kyoto n'impose des engagements contraignants que pour les pays développés regroupés au sein de l'annexe B. Les pays en voie de développement peuvent certes participer à la limitation des émissions mondiales *via* un mécanisme de développement propre encore à définir, mais ils ne font l'objet d'aucune contrainte pour la première période budgétaire 2008-2012. Pour des raisons différentes, les pays membres de l'annexe B comme les pays en voie de développement s'accordent sur l'idée d'un élargissement à terme de l'annexe B. Nord comme Sud se retrouvent en effet pour constater qu'un objectif de limitation des concentrations atmosphériques en GES ne peut être obtenu sans la participation des pays du Sud à la réduction des émissions.

Des considérations économiques à plus court terme motivent aussi les deux groupes. Pour donner une idée schématique des motivations, indiquons que les pays de l'annexe B espèrent ainsi voir leur facture climatique se réduire avec l'élargissement. Ils souhaitent aussi limiter les risques de perte de compétitivité des entreprises fortement consommatrices d'énergie, et caressent l'espoir d'acquérir un leadership technologique sur un marché global des technologies peu émettrices de carbone. Pour les pays du Sud, rejoindre l'annexe B leur permettrait d'éviter les risques de conditionnalité environnementale sur l'aide au développement, de peser plus fort sur la répartition des droits d'émissions et, pour les pays les plus riches, d'avoir accès au marché des technologies propres.

Mais dès lors qu'il s'agit de définir les modalités de cet élargissement, les difficultés commencent. S'opposent à la fois des intérêts économiques, mais aussi des conceptions de fond de l'équité, que nous pourrions très grossièrement résumer par l'opposition entre les deux énoncés suivants :

- « *face à un problème global, tout le monde doit participer et personne ne doit y gagner indûment* »
- « *la responsabilité historique des pays développés les oblige à agir de manière plus importante et plus rapide que les pays en voie de développement. Nous n'avons pas à être freinés dans notre développement par un problème qui est d'abord de la responsabilité du Nord* ».

Dans ce contexte, il n'est pas étonnant de constater que, globalement, les pays du Nord réclament une action rapide et importante des pays du Sud, alors que les pays en voie de développement souhaitent se voir imposer des efforts plus faibles et à plus longue échéance.

La coordination par les quantités mise en place à Kyoto ne facilite pas la discussion. Elle a en effet pour conséquence de créer un hiatus entre l'objet de la négociation (les quotas d'émissions) et la véritable variable faisant office de critère décisionnel à partir duquel les Parties forment la perception de leur intérêt dans la négociation (le coût total). Ce mode de coordination renforce le poids de l'incertitude sur la trajectoire de référence. Certes, la lettre du protocole de Kyoto n'engage en rien la nature de la coordination au-delà de 2012, mais il est clair que la simple présence de cet accord crée en réalité un biais favorable pour une extension de la coordination par les quantités aux périodes budgétaires suivantes. Dans ce contexte, il est nécessaire d'aller jusqu'au bout de la logique inaugurée par l'accord de Kyoto et d'examiner dans quelle mesure l'élargissement de l'annexe B aux pays en voie de développement peut être négocié dans le contexte d'une coordination par les quantités. Avant d'examiner numériquement ces questions au chapitre 8, le présent chapitre a pour objet de revenir en

détail sur la double contrainte politique et d'incertitude sur les scénarios à long terme qui pèse sur l'élargissement de l'annexe B¹.

1. L'héritage de dix ans de négociation sur le climat

La discussion sur l'élargissement de l'annexe B ne surgit pas *ex nihilo* sur l'agenda politique international, mais se présente au contraire comme l'aboutissement logique de dix ans de négociation internationale sur le climat. Il n'est pas question de reprendre ici en détail l'historique de la négociation², mais simplement de rappeler dans cette première section en quoi le processus de négociation conditionne la manière dont se pose aujourd'hui le problème.

1.1. Les enjeux de l'élargissement

La plupart des Etats ne figurant pas au sein de l'Annexe B sont réunis pour la négociation au sein du groupe « G-77 plus Chine » qui, comme son nom ne l'indique pas, regroupe la quasi-totalité des 150 pays non-membres de l'annexe B³. Ce groupe est pourtant loin de former un ensemble homogène. La perception des risques climatiques comme des enjeux économiques est en effet très variée selon les pays. En outre, le degré d'information et les moyens mobilisés par les différentes délégations sont très différents, et souvent faibles pour des petits pays. Trois sous-ensembles principaux peuvent être distingués :

- Les pays AOSIS (*Alliance Of Small Island States*) présentent la particularité d'être menacés dans leur existence même par une possible montée du niveau des océans. Ils se font ainsi les avocats de mesures de réduction des émissions drastiques.
- A l'autre extrême, les pays producteurs de pétrole et en particulier ceux de l'OPEP⁴ voient dans le changement climatique une menace de capture de leur rente pétrolière. Ils se sont ainsi farouchement opposés à toute mesure visant à réduire les émissions de CO₂, au point d'apparaître souvent comme pratiquant une obstruction systématique au processus de négociation.
- Les pays les plus importants, en particulier la Chine, l'Inde et le Brésil, se ménagent une marge de manœuvre propre que leur autorise leur poids économique, démographique et politique.

Malgré ces fortes dissensions, et un poids politique global relativement faible, les pays du G77 se retrouvent sur l'idée selon laquelle seuls les pays développés doivent prendre des mesures de réduction des émissions. Ils invoquent la responsabilité historique dans les émissions passées pour affirmer que les actions de réduction des émissions doivent être entreprises en priorité au Nord (Shukla, 1996, 1998). La Convention Cadre sur le Changement Climatique, ainsi que les décisions des différentes

¹ Nous remercions Daniel Théry de nous avoir donné l'idée de ce chapitre, et pour ses commentaires perspicaces. Nous remercions aussi Thierry Le Pesant pour ses relectures attentives.

² Le lecteur en trouvera un résumé succinct dans l'introduction, et pourra se reporter au texte de Jean-Charles Hourcade (1999) ou à l'ouvrage de synthèse de Michael Grubb (1999) pour une description plus détaillée.

³ Le groupe des 77 (G-77) a été créé le 15 juin 1964 par les soixante-dix-sept pays en voie de développement signataires de la « Déclaration Commune des 77 pays » à la fin de la première conférence des Nations-Unies sur le commerce et le développement (UNCTAD) à Genève (G-77, 1999). Ce groupe, dont le nom original est resté, compte aujourd'hui 133 membres. 18 Etats membres de l'ONU n'appartiennent ainsi ni à l'annexe B, ni au groupe de 77 : 9 républiques de l'ex-URSS (Arménie, Azerbaïdjan, Bélarus, Géorgie, Kazakhstan, Kirgizstan, Moldavie, Tadjikistan, Uzbekistan), l'Albanie, quatre micro Etats ainsi qu'Israël, le Mexique, la Corée du Sud et la Turquie.

⁴ L'Organisation des Pays Exportateurs de Pétrole réunit 13 Etats (Algérie, Arabie Saoudite, Emirats Arabes Unis, Indonésie, Iran, Irak, Koweït, Libye, Nigeria, Qatar, Venezuela) qui représentaient 40% de la production mondiale de pétrole et 75% des réserves connues de brut en 1996.

COP et en particulier le Protocole de Kyoto leur auront donné raison sur ce point : en vertu du principe de « responsabilité commune mais différenciée », la CCUNCC établit ainsi que les pays développés doivent agir afin de « [démontrer] que les pays développés prennent l'initiative de modifier les tendances à long terme des émissions anthropiques conformément à l'objectif de la présente Convention [...] » (Article 4.2, alinéa a).

1.1.1. La réalité des émissions

Si les émissions de CO₂ des pays en développement représentaient en 1996 33,6% du total des émissions anthropiques de ce gaz depuis 1800, l'écart en termes de flux annuels est moins important (Marland *et al.*, 1999). En 1996 en effet, les pays non annexe B représentaient 42% des émissions de CO₂ fossiles (Marland et Boden, 1999).

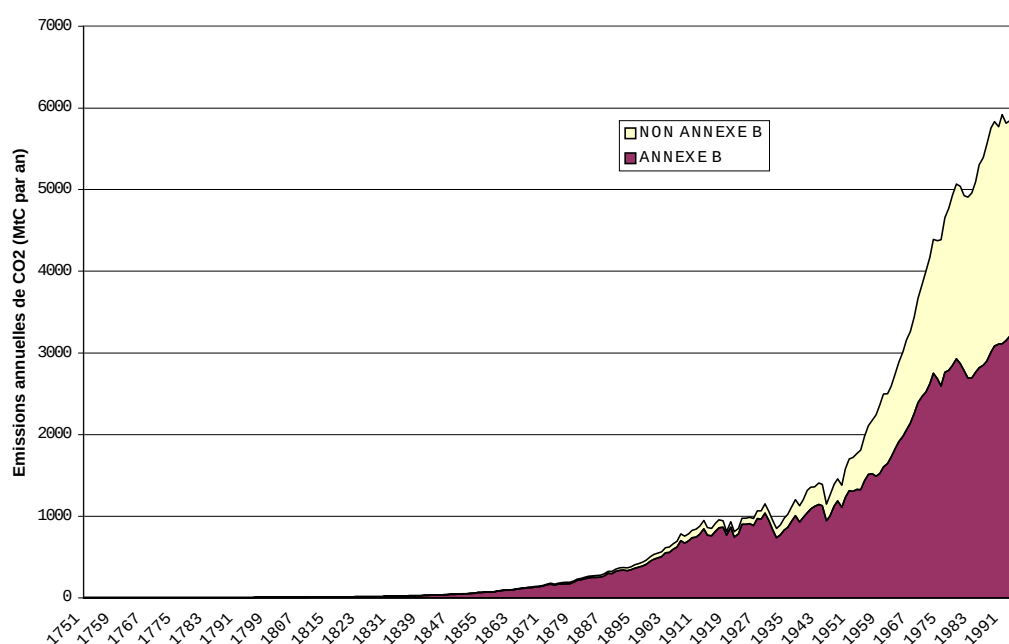


Figure 7.1 Emissions annuelles de gaz à CO₂ des pays de l'annexe B (en noir) et non annexe B (en gris) entre 1750 et 1996 (Source : Marland *et al.*, 1999).

Les scénarios d'émissions futures prévoient dans leur très grande majorité une poursuite du « rattrapage » des émissions des pays de l'annexe B par celles des pays hors de l'annexe B. Les six scénarios de l'IIASA indiquent par exemple tous que les émissions annuelles des pays non annexe B pourraient dépasser celles de l'annexe B entre 2015 et 2030. La part des émissions des pays en voie de développement dans les émissions cumulées depuis 1800 progresse bien entendu plus lentement, mais elle dépasse 40% entre 2030 et 2040 et atteint 50% à la fin du siècle prochain, entre 2090 et 2100 (Nakicenovic *et al.*, 1998, Morita et Lee, 1997).

Dans ce contexte, les modèles climatiques montrent qu'il n'est pas possible de mettre en œuvre une politique de réduction des émissions efficace sans impliquer les pays non annexe B. Supposons pour fixer les idées que les pays de l'annexe B décident et parviennent à appliquer dès 2020 un niveau d'émissions de 50% de celui de 1990. Même sous cette hypothèse extrême, si les émissions de CO₂ des pays non annexe B suivent une trajectoire d'émissions moyenne comme par exemple celle du scénario IIASA & WEC A2, alors la concentration atmosphérique en CO₂ atteindra tout de même 590 ppm en 2100 et ne pourra être stabilisée en dessous de 650 ppm. Si les pays de l'annexe B stabilisent leurs émissions au niveau de 1990, alors la concentration dépassera 630 ppm en 2100 pour une stabilisation au niveau minimal de 700 ppm. De tels niveaux de stabilisation des concentrations ne

sont acceptables que dans la mesure où les dommages du changement climatique sont supposés être relativement faibles, ce qui constitue, en l'état actuel des connaissances scientifiques, un jugement pour le moins risqué.

1.1.2. Les enjeux à court et moyen terme

Au-delà du risque climatique à long terme, les pays de l'annexe B comme hors de l'annexe B ont des intérêts plus immédiats à un élargissement de l'annexe B. Pour les pays développés tout d'abord, nous pouvons résumer leurs motivations par trois considérations principales :

- Les risques de pertes de compétitivité : plusieurs analystes mettent en avant les risques de voir la compétitivité des industries grosses consommatrices d'énergie au Nord, mises en péril par l'imposition d'une contrainte sur les émissions de CO₂ (Becker, 1999, Manne, 1999b). C'est cet argument qui sert de justification principale au Sénat Américain pour rejeter toute ratification du Protocole de Kyoto tant que les pays en voie de développement n'auront pas pris des engagements importants (résolution Byrd, 1997), même si les conséquences macroéconomiques de la mise en place d'une contrainte climatique dans les pays du Nord restent controversées.
- L'espoir de coûts plus faibles au Sud. La plupart des modèles économiques considèrent qu'il existe dans les pays en voie de développement des gisements importants d'opportunités de réduction des émissions à coût très faible. L'ouverture de l'annexe B aux pays du Sud couplée avec la mise en place de mécanismes de flexibilité pourraient ainsi diminuer la facture climatique dans des proportions importantes. Dans les principaux modèles rassemblés par l'OCDE en 1998, le prix des permis consécutif à la mise en place des objectifs de Kyoto passe ainsi en moyenne de 80\$ à 35\$ lorsque les pays du Sud entrent dans le marché (Van der Mensbrugghe, 1998).
- L'espoir de leadership technologique sur les technologies propres. Les pays en voie de développement, actuellement en phase de constitution de leurs équipements énergétiques, représentent un marché très important pour la vente de technologies propres.

Des considérations économiques à court et moyen terme incitent aussi les pays en voie de développement à entrer dans l'annexe B. Ces motivations sont cependant différentes de celles du Nord :

- En premier lieu, une partie des pays en voie de développement craint qu'une « conditionnalité environnementale » vienne s'ajouter à la liste des contraintes qui pèse sur l'aide au développement. Dans la même logique mais sous une forme différente, des risques de rétorsion de la part des pays du Nord à l'encontre des pays du Sud hors de l'annexe B ne sont pas à exclure (mise en place de normes environnementales sur le contenu carbone par exemple, double étiquetage des produits « propres » et des produits « sales », etc.).
- En second lieu, la position des pays en voie de développement hors de l'annexe B affaiblit leur pouvoir de négociation sur les termes mêmes de la Convention Climat. Dans ce contexte, les pays du Sud perçoivent un risque de « nouveau partage colonial » des droits à émettre, sur lequel ils n'auraient pas pesé, et qui leur serait un jour imposé de manière unilatérale.
- En troisième lieu, une partie des pays du Sud, et en particulier les plus riches, ne souhaitent pas se couper d'un marché international de permis d'émissions négociables et des technologies propres qui y seront associées.

Derrière ces éléments de motivation se cachent deux conceptions de l'équité différentes. Pour les pays du Nord, face à un problème global, tout le monde doit participer et personne ne doit y gagner indûment. Pour les pays du Sud au contraire, la responsabilité historique des pays développés les oblige à agir de manière plus importante et plus rapide que les pays en voie de développement. Les

pays du Sud estiment ne pas avoir à être freinés dans leur développement par un problème qui est d'abord de la responsabilité du Nord.

Les pays du Sud ne sont pas *a priori* opposés à un élargissement de l'annexe B. Mais, comme le stipule la communication du groupe des 77 du 5 juin 1998, « *The rules governing the mechanisms, namely, activities implemented jointly, joint implementation, clean development mechanism and emission trading should be determined on the basis of equity, sustainable development and the other principles of the Convention* » (G-77 & China, 1998). Nous retrouvons ici sous une forme moderne un débat ancien entre environnement et développement. Dans ce contexte, la négociation sur le Mécanisme de Développement Propre se révèle particulièrement importante. L'article 12 du Protocole de Kyoto qui crée ce mécanisme est en effet particulièrement ambigu, ce qui laisse une marge de manœuvre considérable pour construire un mécanisme de développement propre qui permette à la fois des réductions d'émissions et la mise en place de véritables programmes de développement (Mathy et De Gouvello, 1999)⁵.

1.2. Coordination par les prix ou coordination par les quantités, le legs du Protocole de Kyoto

Nous ne reviendrons pas ici le détail de ce qui a fait que le protocole de Kyoto, suivant en cela le libellé de la Convention Cadre sur le Changement Climatique puis le mandat de Berlin, a formulé les contraintes climatiques en termes de quantités émises. Rappelons simplement que la proposition d'une taxe internationale sur le carbone a perdu beaucoup de crédibilité juste avant la Conférence de Rio (1992) du fait de la décision de l'Europe de ne pas la mettre en place à l'intérieur de la Communauté. Devant l'opposition résolue des milieux d'affaire et des Etats-Unis, ainsi que des ONG environnementalistes, la notion d'une approche par les quantités s'est finalement imposée. La Convention Cadre sur le Changement Climatique qui formule ainsi son objectif final en termes de « *niveau [de concentration] qui empêche toute perturbation anthropique dangereuse pour le système climatique* ». Trois ans plus tard, le Mandat de Berlin parachève le dispositif en donnant mandat aux Parties pour négocier des objectifs de réduction des émissions quantitatifs, objectifs qui seront finalement décidés à Kyoto.

D'un strict point de vue juridique, le protocole ne préjuge en rien de la forme des accords internationaux qui définiront l'après 2012. Il est clair cependant que nous sommes entrés ici dans une forme de « *lock-in* » intellectuel, diplomatique et bientôt institutionnel sur lequel il sera difficile de revenir.

- « *Lock-in* » intellectuel en premier lieu car l'ensemble des acteurs a intégré depuis 1992 le fait que l'effort pour le climat soit envisagé en termes de quantités.

⁵ Nous pouvons rajouter à ces considérations un éclairage de nature dynamique. Si nous revenons pour un instant au point de vue collectif que pourrait adopter un planificateur global, l'intérêt de l'élargissement de l'annexe B aux pays en voie de développement va dépendre de manière critique de la nature des politiques climatiques qui seront menées tant au nord qu'au sud. Si l'ouverture sert aux pays du Nord à éviter des actions domestiques dans les secteurs les plus rigides tout en ne finançant pas non plus dans les pays du Sud, nous nous trouvons alors dans une configuration à termes très dangereuse. Si l'ouverture permet au contraire de mieux contrôler les dynamiques de croissance des secteurs les plus rigides (habitat et surtout transports) dans les pays du Sud, la configuration apparaît alors comme plus intéressante.

Un système de flexibilité mondial économisant une quantité donnée de carbone peut donc tout autant être profitable à long terme au Nord comme au Sud (mise en œuvre de politiques sur les structures urbaines) qu'épuiser à la fois les sources de réduction des émissions de court terme dans les deux hémisphères (abattements principalement centrés sur le méthane et sur des changements d'usage finaux de l'énergie au Nord, simples remplacements des centrales les plus polluantes au Sud). Cette discussion dynamique sur la flexibilité comparée des systèmes technico-économiques au Nord et au Sud demande des recherches complémentaires.

- « *Lock-in* » diplomatique ensuite pour deux raisons principales : d'une part le choix d'une négociation par les quantités répond aux demandes de certains groupes de pression comme les ONG. Toute remise en cause de ce point serait donc considérée par elles comme une défaite. D'autre part, d'un point de vue diplomatique, il s'agit d'un débat déjà tranché (Hourcade, 1999).
- « *Lock-in* » institutionnel enfin car l'ensemble des mécanismes de régulation et de vérification du protocole qui devraient être mis en place d'ici 2008 seront bâtis autour de la notion d'engagements quantitatifs.

Si beaucoup de choses peuvent encore se passer avant que la seconde période budgétaire ne soit discutée, à commencer par une non-application du protocole de Kyoto, nous ferons ici l'hypothèse qu'un changement de paradigme serait trop coûteux, et que la négociation s'orientera donc naturellement vers des engagements quantitatifs.

Si le législateur était parfaitement informé sur le coût social de la pollution et sur les coûts des techniques d'abattement, alors coordination par les prix (au moyen d'une écotaxe) ou par les quantités (au moyen de quotas) seraient strictement équivalentes. L'écotaxe peut en effet être fixée en fonction du niveau de dépollution désiré, et en sens inverse le planificateur peut fixer ce niveau désiré et le marché détermine alors le prix d'équilibre des PEN $P_{opt} = \text{taxe}$. Dans les deux cas, les pollueurs sont incités à mettre en œuvre les mêmes solutions de dépollution, celles dont le coût marginal est inférieur ou égal à la valeur de la taxe ou au prix des PEN, comme le montre la figure 7.2 ci-dessous.

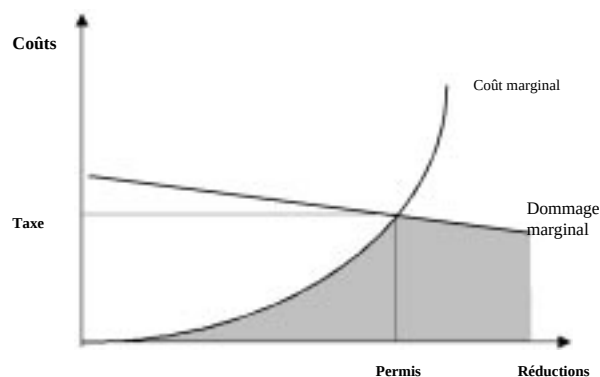


Figure 7.2 : Equivalence taxe – permis en univers certain.

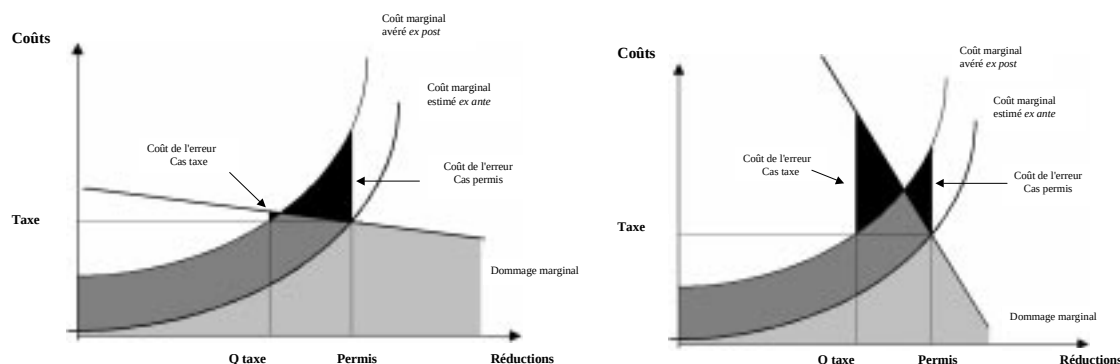
Or, nous avons vu que dans le cas de l'effet de serre, les acteurs n'ont une expérience directe ni des dommages du changement climatique, ni des coûts de réduction des émissions. Dans ce contexte, choisir les prix ou les quantités comme objet de la coordination revêt deux significations économiques très différentes :

- Une coordination par les prix signifie que l'ensemble des acteurs s'accorde sur un même coût marginal de la dépense en matière climatique. Ils obtiennent ainsi une garantie sur l'effort marginal consenti, puisque les taxes sont observables, mais pas sur le niveau final de réduction des émissions.
- Une approche par les quantités signifie au contraire que chaque pays s'engage sur un objectif quantitatif de réduction des émissions et accepte les risques d'une incertitude sur les coûts consentis. S'engager sur des quantités signifie donc rechercher une garantie plus forte sur l'objectif final au prix d'une incertitude sur les coûts.

Toute la question est donc de savoir sur quelle variable reporter l'incertitude. Il est connu depuis la parution en 1974 d'un article de Weitzman, qu'à niveaux d'incertitudes donnés, le choix d'une coordination par les quantités ou par les prix dépend de la pente relative des courbes de coûts marginaux et des courbes de dommages marginaux. Si nous anticipons que la pente de la courbe de dommages est plus forte que celle de la courbe de coûts d'abattement, mieux vaut alors adopter une

contrainte sur les quantités. Dans le cas contraire, une taxe s'avère économiquement préférable, car elle définit le montant unitaire maximal qu'il sera demandé aux agents de payer au titre de la lutte contre la pollution.

La démonstration, que nous ne reprendrons ici que de façon graphique, repose sur la minimisation du coût de l'erreur. (cf. figures 7.3 et 7.4). Nous pouvons donner une idée du résultat en comparant deux cas extrêmes : si nous sommes certains que des rejets polluants donnés vont engendrer des dommages importants au-delà d'un certain seuil, il convient d'imposer des limites quantitatives strictes (cas des normes sanitaires par exemple). En revanche, si nous sommes sûrs que le contrôle des émissions polluantes croît très rapidement en fonction des objectifs, et si l'ampleur des dommages évités est au contraire très incertaine, il est de bonne politique de s'assurer du contrôle des dépenses pour ne pas être mécaniquement entraînés à des coûts économiques inacceptables.



Figures 7.3 et 7.4 : Perte de surplus comparée d'une taxe ou de permis en cas d'incertitude sur les coûts et de dommages marginaux « plat » (figure de gauche) ou « abrupts » (figure de droite). Source : CIREN (1999).

Pizer (1997) et Newell et Pizer (1998) étendent ce raisonnement au cas du changement climatique. Ils remarquent que la nature même du problème climatique nous place dans le cas où la coordination par les prix est préférable. Il est en effet probable que la courbe de dommages soit relativement plate. Ce résultat ne s'inverse que sous deux hypothèses : présence de catastrophes climatiques à un horizon relativement proche (quelques décennies) ou progrès technique endogène avec forte baisse dans le temps du coût des technologies non carbonées qui « aplatirait » la courbe des coûts marginaux d'abattement. Newell et Pizer considèrent que l'incertitude sur ces deux éléments est trop importante pour renverser la prédominance initiale d'un système de coordination par les prix, ce qui n'empêcherait pas, dans une deuxième période, de renverser la proposition en fonction d'éléments nouveaux.

Le choix d'une coordination par les quantités fait à Kyoto renforce donc l'impact de deux incertitudes sur la décision : l'incertitude sur les coûts d'abattement, et l'incertitude sur la trajectoire de référence puisque l'effort réel de réduction des émissions dépend de la différence entre le quota qui aura été négocié et la trajectoire de référence. Nous nous proposons d'examiner cette dernière incertitude dans la seconde section de ce chapitre.

2. De la diversité des scénarios de référence

Dans le contexte du protocole de Kyoto, mettre en place des politiques d'abattement à moyen terme nécessite donc aujourd'hui de faire face à une double incertitude portant sur l'évolution des coûts d'abattement futurs comme sur l'évolution des trajectoires d'émissions de référence. Chacune de ces deux incertitudes ramène en fait à la question fondamentale de la nature du scénario de référence à long terme.

En second lieu, dès lors qu'il s'agit d'évaluer les coûts indirects de la mise en place de ces quotas (baisse de la croissance induite liée aux sommes détournées au profit de la lutte contre le climat, impacts des variations des prix des énergies fossiles sur la balance commerciale, possibles délocalisations des industries intensives en carbone, etc.), il est nécessaire de disposer en sus d'une information beaucoup plus complète sur la nature des trajectoires économiques de référence. Les taux de croissance et les intensités énergétiques régionales constituent en l'occurrence les données minimales pour envisager une telle évaluation.

En troisième lieu, la plupart des règles d'attribution des quotas d'émissions proposées dans la littérature dépendent elles-mêmes d'indicateurs macroéconomiques. La règle de convergence d'Anil Agarwal et de Sunita Narain (1998) repose sur les dynamiques de population régionales. Henry Jacoby *et al.* (1999) allouent leurs quotas en fonction du PIB par tête. D'autres se réfèrent encore à l'intensité énergétique (Colombier, 1998) ou à une combinaison de plusieurs indicateurs. En résumé, l'évaluation des coûts des politiques d'élargissement de l'annexe B ne peut se faire indépendamment d'une projection à long terme d'indicateurs économiques dans le scénario de référence.

En quatrième lieu, nous avons abondamment souligné le fait que les paramètres du calcul économique eux-mêmes dépendent des hypothèses formulées sur la croissance à long terme.

Bien entendu, chacune de ces variables ne peut être étudiée isolément. La consommation d'énergie et le PIB ne sauraient par exemple être traitées indépendamment sauf à prendre le risque de formuler des hypothèses hasardeuses à la fois sur la nature des activités qui dirigent la croissance et sur le rythme du progrès technique. La présente section a donc pour objet d'examiner les principaux scénarios économiques et énergétiques de référence proposés dans la littérature. L'objectif n'est pas ici d'en faire une recension complète⁶, mais d'illustrer et d'analyser la diversité de ces projections.

2.1. 16 scénarios désormais incontournables... +1

En avril 1998, la base de donnée des scénarios de référence rassemblée par le GIEC (Morita et Lee, 1997) comportait plus de 416 scénarios provenant de 171 sources différentes. Même en limitant la recherche aux seuls travaux à la fois mondiaux et régionalisés, cette base de donnée proposait encore une centaine de scénarios fournis par 32 sources différentes. L'ampleur de l'offre, qui s'est encore accrue depuis la mise en place de cette base, nous impose donc de faire un choix.

Au palmarès des scénarios de référence, les six IS92 proposés par le GIEC en 1992 (Leggett *et al.*, 1992, Alcamo *et al.*, 1994) s'imposent de manière évidente. Malgré leur relative ancienneté, ils constituent toujours une référence incontournable pour les modélisateurs. Le scénario IS92a en particulier constitue probablement le scénario de référence de la majorité des évaluations numériques des politiques climatiques à ce jour. Les quatre nouveaux scénarios élaborés par le GIEC (SRES, 1999b) pour remplacer les anciens sont eux aussi incontournables.

Au-delà de ces deux poids lourds, le choix est plus arbitraire. Nous retenons ici les six scénarios publiés par l'IIASA et le WEC⁷ (IIASA & WEC, 1995, Nakićenović *et al.*, 1998), ainsi que le « *Modeller's reference case* » du modèle SGM (Edmonds *et al.*, 1997). En termes de diffusion et de réutilisation dans d'autres travaux de modélisation, les trajectoires de référence de l'*Energy Modelling Forum* ou le scénario régionalisé proposé par Manne et Richels (1992) auraient tout autant mérités de figurer dans la liste. Nous nous sommes finalement déterminés sur le fait que nous utilisons par ailleurs les travaux de l'IIASA et du WEC (chapitre 6) et les résultats du modèle SGM (chapitre 8).

⁶ Le *Special report on emission scenarios* de le GIEC en préparation pour l'an 2000 consacrera un chapitre entier à la comparaison exhaustive des scénarios de référence proposés dans la littérature jusqu'en 1997.

⁷ Pour « *International Institute for Applied System Analysis* » et « *World Energy Council* ».

2.1.1. Scénarios GIEC IS92 a à f

Dès 1989, le GIEC a souhaité préparer des scénarios d'émissions permettant de fournir aux climatologues une base pour estimer les changements climatiques possibles à l'horizon 2100 si aucune politique climatique n'était mise en œuvre d'ici là. Ce premier jeu de scénario a été publié en 1990 (IPCC, 1990). Compte tenu des évolutions géopolitiques majeures survenues à cette époque (guerre du Golfe, chute du mur de Berlin), de nouvelles données prospectives dans le domaine de la population, d'une révision à la hausse des émissions liées à la déforestation et de la nécessité d'inclure d'autres gaz à effet de serre non pris en compte en 1990, le GIEC a rapidement décidé de se doter d'un nouveau jeu de scénarios qui sera finalement publié en 1992 (Leggett *et al.*, 1992).

Ces scénarios vont connaître un succès très important à la fois comme données d'entrée des modèles climatiques, mais aussi comme scénarios de référence des très nombreuses études économiques publiées depuis lors. Le scénario IS92a en particulier, présenté comme le cas « central » ou « médian » par le GIEC en 1992, est quasi systématiquement employé par les modélisateurs, le chapitre 1 de la présente thèse ne faisant pas exception à cette règle. Il est donc important de les examiner même si un nouveau jeu de scénarios du GIEC est en phase finale d'élaboration et devrait prochainement les remplacer.

D'un point de vue méthodologique, notons que les scénarios IS92 ont été numérisés au moyen du modèle ASF (*Atmospheric Stabilization Framework*) développé par l'Agence de Protection de l'Environnement américaine. Ce modèle énergétique calcule en fonction d'hypothèses générales sur la croissance économique et démographique et sur le progrès technique, le jeu de prix qui équilibre offre et demande d'énergie. Il combine ensuite ces résultats à des hypothèses technologiques pour en déduire les émissions de CO₂ dans différents secteurs de l'économie (SRES, 1999a).

Les scénarios IS92 sont au nombre de six. Le premier, IS92a, est un scénario « médian » dont le second IS92b constitue une variation mineure. Les quatre scénarios restant, respectivement dénommés IS92c, d, e et f, font varier de manière importante les projections sur la croissance économique et/ou démographique. Ils constituent ainsi des cas extrêmes destinés avant tout à aider l'analyse de sensibilité des modèles économiques.

- Le scénario IS92a représente ainsi une projection médiane, avec une population de 11,3 milliards d'habitants en 2100 et un taux de croissance mondial 1990-2100 de 2,3% par an. Le scénario IS92b ajoute à IS92a des politiques et mesures liées au CO₂ qui entraînent une petite réduction des émissions (-6% en 2100).
- Le scénario IS92c suppose une croissance beaucoup plus faible de la population (jusqu'à 6,4 milliards en 2100), ainsi qu'une croissance économique de 1,2% par an.
- Le scénario IS92d reprend les mêmes hypothèses démographiques qu'IS92c, mais avec une croissance économique plus forte (2% par an) qui, même si elle contribue à faire pénétrer plus rapidement les technologies propres, entraîne au final des émissions plus élevées (9,9 GtC par an en 2100 dans IS92d contre 4,6 dans IS92c).
- Le scénario IS92e reprend les hypothèses de population de IS92a, mais fait l'hypothèse d'une croissance économique nettement plus rapide (3% par an entre 1990 et 2100). Du fait d'hypothèses basses sur la pénétration des technologies propres, les émissions atteignent 34,9GtC en 2100.
- Le scénario IS92f enfin suppose une croissance de la population plus massive que dans IS92a (17,6 milliards d'habitants en 2100), mais le même taux de croissance de l'économie. Les émissions s'établissent alors à 25,9 GtC par an en 2100, ce qui traduit le fait que la croissance économique est dans le modèle ASF le principal moteur des émissions de carbone (Alcamo *et al.*, 1994).

Le GIEC a conduit en 1994 une importante entreprise d'expertise des scénarios IS92 (Alcamo *et al.*, 1994) basée sur une comparaison systématique avec les trajectoires de référence publiées dans la littérature après 1992. Cette évaluation a permis de montrer que d'un point de vue global, les scénarios IS92 couvrent correctement le champ des possibles. Du point de vue régional par contre, les hypothèses retenues s'avèrent la plupart du temps trop élevées ou trop faibles par rapport aux projections régionales publiées postérieurement, en particulier pour les pays de l'Est. En outre, les estimations des émissions de GES autres que le CO₂ sont jugées peu fiables et un effort est demandé pour mieux assurer la cohérence des hypothèses économiques de base (IPCC, 1994).

Alcamo *et al.* (1994) se penchent enfin sur le cas du scénario IS92a. Ils rappellent qu'il ne s'agit pas d'un scénario médian, et que même si tel était le cas, il n'y aurait aucune raison pour le considérer comme un futur plus probable que les autres. Ils recommandent de fait d'utiliser l'ensemble des six scénarios de référence et non pas un seul, une recommandation qui se révèle aujourd'hui avoir été peu suivie.

2.1.2. Scénarios IIASA&WEC 1995 A1,A2,A3,B,C1,C2

Les six scénarios publiés par l'IIASA et le Conseil Mondial de l'Energie (WEC) en 1998 sont en fait le résultat de huit années de recherches menées conjointement par ces deux organismes. Le point de départ est donné en 1993 par le rapport *Energy for tomorrow's world* (WEC, 1993) qui analyse l'avenir de l'offre et de la demande énergétique au niveau mondial à l'horizon 2020. Sur cette base, l'IIASA et le WEC développent 6 scénarios énergétiques à l'horizon 2100 (IIASA & WEC, 1995). Ces scénarios ont ensuite été relus et régionalisés pour aboutir à l'ouvrage *Global Energy Perspective* (Nakićenović *et al.*, 1998).

Comme l'indique le nom de cette étude, l'objectif principal de l'IIASA et du WEC est d'étudier les évolutions possibles du secteur énergétique. Il est par conséquent logique de constater que les niveaux des réserves énergétiques fossiles, la nature du progrès technique à long terme dans ce secteur et la forme plus ou moins volontariste des politiques publiques sont les paramètres discriminants entre les scénarios. La croissance économique, donnée de manière exogène, vient ensuite avec une fourchette relativement étroite (entre 2,1% et 2,5%). Les incertitudes sur l'évolution démographique ne sont par contre pas prises en compte : les six scénarios comportent la même évolution démographique basée sur les projections de la Banque Mondiale de 1992.

Le premier scénario, dénommé A, est très optimiste sur la croissance (2,5% de croissance annuelle mondiale moyenne d'ici à 2100) et sur le progrès technique. En termes régionaux, la croissance très rapide des pays en voie de développement leur permet de rattraper d'ici à 2100 leur retard sur les pays développés. Du point de vue de l'offre énergétique, trois options sont considérées :

- Dans le scénario A1, l'offre d'énergie pour le siècle prochain est principalement basée sur le pétrole et le gaz naturel. Dans ce scénario, les hypothèses sur les niveaux des réserves de pétrole et de gaz naturel et sur le progrès technique sont telles que ces deux sources d'énergie s'avèrent à la fois abondantes et abordables pour assurer une transition progressive vers des énergies alternatives (hydrogène par exemple) à la fin du siècle prochain sans entraîner de crise majeure ni obliger à recourir massivement au charbon.
- Dans le scénario A2 au contraire, les réserves limitées en pétrole et en gaz naturel font du charbon l'énergie principale du XXI^e siècle. L'ampleur des réserves et le progrès technique massif dans ce domaine permettent d'envisager à l'horizon 2100 une économie exclusivement charbonnière.
- Le scénario A3 repose quant à lui sur des hypothèses très optimistes sur le progrès technique dans le domaine du nucléaire et des énergies renouvelables. La pression sur les ressources en pétrole et en gaz naturel reste alors limitée, et nous aboutissons en 2100 à un monde qui s'appuie à parts à peu près égales sur le nucléaire, le gaz naturel, la biomasse et les autres énergies renouvelables.

Le scénario B est globalement moins optimiste que A. Il prolonge les tendances de croissance économiques actuelles (2,1% de croissance annuelle moyenne d'ici à 2100). Le développement des pays du sud reste très inégal. En l'absence d'un fort progrès technique, la pression sur les ressources de pétrole et de gaz naturel se révèle importante et aboutit à une transition vers le nucléaire et le charbon dans la seconde moitié du XXI^e siècle.

Le scénario C enfin est caractérisé par une très forte implication de la communauté internationale en matière d'environnement et de développement. Le taux de croissance économique moyen est quasiment identique à celui du scénario B (2,2%). La mise en œuvre de politiques nationales et internationales volontaristes permet par contre de réduire les émissions de gaz à effet de serre à 2 GtC par an en 2100, soit à peine le tiers des émissions actuelles. La manière dont ce résultat est atteint dépend principalement des développements technologiques et de l'acceptabilité du nucléaire.

- Dans le scénario C1 le nucléaire assure la transition au début du siècle prochain mais est ensuite progressivement éliminé au fur et à mesure que d'autres technologies propres deviennent rentables.
- Dans le scénario C2 par contre, tout en conservant les mêmes objectifs environnementaux que C1, le nucléaire reste la pierre angulaire de l'offre énergétique jusqu'en 2100.

A partir de ces données macroéconomiques, les auteurs ont estimé les demandes d'énergie finale à l'aide d'un modèle économétrique, puis affiné ces projections en utilisant conjointement les modèles « top-down » GLOBAL 2100 (Manne et Richels, 1992) et « bottom-up » MESSAGE III (Messner et Strubegger, 1995). Ils obtiennent ainsi une description précise du système énergétique dans chacun des scénarios.

2.1.3. Scénario GIEC IS98 A1, A2, B1, B2

Le GIEC a entrepris en 1996 de remplacer la famille des IS92 par un nouveau jeu de scénarios de référence. Outre procéder à une nécessaire actualisation des données⁸, ce travail avait un triple objectif : mieux prendre en compte les GES autres que le CO₂, pallier l'absence dans les IS92 de scénario postulant un rapprochement des revenus par tête entre pays développés et pays en voie de développement, et enfin prendre en compte une fourchette d'hypothèses plus large sur le progrès technique en matière de décarbonisation. Sur le plan méthodologique, une meilleure cohérence interne des scénarios était de surcroît attendue.

Il est important de souligner ici le caractère novateur du processus de construction de ces scénarios. Au-delà de la durée exceptionnelle de l'entreprise⁹ ou de l'importance des moyens humains et matériels qui lui ont été consacrés, c'est la démarche elle-même qui est originale. La construction des nouveaux scénarios du GIEC a en effet comporté cinq étapes : (i) une revue exhaustive des scénarios de la littérature (Morita et Lee, 1997), (ii) l'élaboration de synopsis littéraires soumis ensuite (iii) à l'évaluation numérique de 6 équipes de modélisateurs dans le monde entier et à (iv) une large expertise internationale via un site internet spécifique (<http://sres.ciesin.org>), et enfin (v) une relecture par le groupe III du GIEC. Ce mécanisme de relectures croisées systématiques garantit la qualité des

⁸ Les chiffres des scénarios IS92 pour l'année 1990 sont en réalité des projections, les données statistiques correspondantes n'étant pas encore disponibles au moment de la construction de ces scénarios. En second lieu, les projections pour l'année 2000 doivent être fortement revues, en particulier du fait de la crise économique dans les pays de l'Est.

⁹ La construction des nouveaux scénarios du GIEC s'étend sur quatre ans entre 1997 et 2000. A l'heure où nous écrivons ces lignes, la première version du rapport final arios est en cours de révision au sein du groupe III du GIEC. Ce rapport devrait être publié dans le courant de l'année 2000.

scénarios finalement retenus, au détriment peut-être d'une certaine audace que ce processus ouvert et consensuel ne favorise pas¹⁰.

Le *Special Report on Emission Scenarios* propose quatre familles de scénarios notées successivement A1, A2, B1 et B2. Ces quatre familles ont fait l'objet d'un synopsis littéraire et ont ensuite été « mises en chiffres » par différentes équipes de modélisation à travers le monde. Le SRES propose ainsi *in fine* 30 scénarios différents. Néanmoins, il existe pour chacune de ces familles un scénario représentatif (*marker scenario*) dont le SRES lui-même recommande l'usage dans la mesure où la gamme des possibles couverte par les quatre scénarios représentatifs donne une bonne idée de la gamme des possibles couverte par les 30 scénarios globaux (SRES, 1999b). Nous nous limiterons donc à ces quatre scénarios¹¹. Nous parlerons par abus de langage du scénario A1 et non de la famille de scénarios A1.

			Ouverture économique	
			Elevée (1)	Faible (2)
Importance des questions d'environnement et de développement	des questions et de	Faible (A)	A1	A2
		Elevée (B)	B1	B2

Tableau 7.1 : Positionnement des scénarios IS98 en fonction des hypothèses sur la nature des échanges économiques (en colonnes) et l'importance de la préoccupation environnementale dans les politiques publiques (en lignes).

Les quatre scénarios A1, A2, B1 et B2 peuvent être situés au croisement de deux axes (tableau 7.1 ci-dessus) :

- plus ou moins grande ouverture des différentes économies nationales, qui conduit à des mondes économiquement plus ou moins homogènes (1 vs 2)
- plus ou moins grande importance des questions d'environnement et de développement dans l'élaboration des politiques publiques nationales et internationales. (A vs B)

D'une manière plus précise,

- le scénario A1 décrit un monde connaissant une croissance économique très élevée, une faible augmentation de la population et un progrès technique important permettant l'introduction et la diffusion rapide de technologies plus efficaces. Dans ce monde, la convergence des économies est rapide du fait de leur ouverture massive.
- Le scénario A2 décrit un monde beaucoup plus hétérogène, dans lequel la primauté est donnée aux groupements régionaux et locaux. La croissance de la population est élevée, le développement économique très inégal et le progrès technique beaucoup plus lent que dans le scénario précédent.
- Le scénario B1 décrit un monde qui converge rapidement vers une économie « dématérialisée », caractérisée par l'introduction massive de technologies propres. Une forte coopération internationale permet la mise en œuvre de solutions globales aux problèmes d'environnement et de développement.

¹⁰ Il serait tout à fait intéressant de procéder à un examen d'ordre sociologique de ce « processus ouvert » afin d'évaluer les éventuels biais dont peuvent souffrir les scénarios qui en sont issus.

¹¹ Ces scénarios sont de toute manière les seules pour lesquels des données numériques complètes soient aujourd'hui disponibles.

- Le scénario B2 décrit un monde dans lequel chaque région recherche de manière plus individuelle sa propre voie vers le développement soutenable. Le développement technique est à nouveau plus lent que dans le scénario 1 correspondant, avec la recherche de solutions locales plutôt que globales aux problèmes d'environnement.

Notons pour terminer que les scénarios du SRES ont été régionalisés sur la base de quatre grandes régions : OCDE90 qui regroupe tous les pays qui appartenaient à l'OCDE à cette date, REF qui comprend les pays de l'annexe B ne faisant pas partie du groupe précédent, et en particulier les pays de l'Est et la Russie, ASIA qui regroupe les pays asiatiques non membres de l'annexe B et ALM qui comporte tous les autres pays non membres de l'annexe B.

2.1.4. Scénario SGM97

Le dernier scénario de référence que nous examinons dans ce chapitre a été développé par Jae Edmonds et son équipe de l'institut Battelle (Washington) pour la calibration du modèle d'évaluation économique des politiques climatiques SGM. La comparaison de ce scénario de référence avec les scénarios du GIEC ou de l'IIASA est importante pour la suite de notre propos : les coûts d'abatement régionaux du modèle de simulation d'un marché de permis d'émissions négociables de CO₂ présenté au chapitre suivant sont en effet calibrés à partir des résultats du modèle SGM. La position de ce scénario nous permettra ainsi de nourrir la discussion que nous pourrions mener ultérieurement sur nos propres résultats.

Le modèle SGM est un modèle d'équilibre général calculable mondial centré sur l'énergie. Dans sa version de 1997¹², le monde est découpé en 13 grandes régions ou pays qui échangent entre eux. Chaque région comporte 13 secteurs dont 11 sont énergétiques (production d'énergie primaire et production d'électricité) et 2 seulement non énergétiques (agriculture et production industrielle et services) (Edmonds *et al.*, 1991, Fischer-Vanden *et al.*, 1993, IAT, 1997). Dans chacun des secteurs énergétiques, les différentes technologies sont représentées de manière très fine. Outre qu'il est essentiellement consacré au secteur énergétique, le modèle SGM présente la particularité de générer de manière endogène tant la population que le taux de croissance économique :

- Pour la population, un module démographique projette la population dans chaque région en fonctions d'hypothèses exogènes portant les taux de natalité, de mortalité et de fertilité ainsi que sur les taux d'immigration. A notre connaissance, ce module ne prend en compte aucune donnée économique endogène.
- En ce qui concerne l'économie, le modèle trouve à chaque période les prix qui équilibrent les différents marchés de biens et services et calcule simultanément à partir de ces prix le montant et la direction des investissements de chacun des agents de cette économie. La croissance économique apparaît ainsi comme un paramètre endogène au fonctionnement du modèle.

2.2. Méthodologie d'analyse : la décomposition en indicateurs

a) Décomposition des émissions de CO₂

S'il s'agissait pour nous simplement d'illustrer la diversité des scénarios économiques futurs, nous n'aurions à vrai dire besoin d'aucune discussion supplémentaire. Une simple représentation graphique des trajectoires d'émissions, de PIB ou de population à long terme analogue à celle que nous avons proposée en conclusion du chapitre 6 suffirait aisément à convaincre le lecteur de l'importance des incertitudes. De telles images seraient cependant incapables de nous apprendre quoi que ce soit sur les

¹² Le scénario de référence utilisé ici ainsi que l'ensemble de la discussion que nous allons mener sur SGM sont relatifs à des données datant de 1997. Notre travail ne tient en particulier pas compte des évolutions que le modèle et son scénario de référence ont pu subir depuis lors.

rapports entre les incertitudes pesant sur ces différentes variables. Or percevoir ces cohérences est nécessaire pour évaluer la nature de l'incertitude globale qui pèse sur les scénarios futurs.

Il pourrait nous être objecté que les cohérences entre les variables ne sont pas à rechercher dans l'examen des trajectoires des grandes variables macroéconomiques mais dans les équations des modèles ayant servi à produire ces chiffres. Tous les scénarios que nous avons retenus ont en effet été numérisés au moyen de grands modèles économiques. Il s'agit cependant dans tous les cas d'une représentation numérique *ex post* d'un synopsis déjà rédigé. En outre, quand nous avons accès aux codes des modèles, rien ne nous est indiqué sur la manière dont ils ont été utilisés pour produire ces chiffres. L'évolution chiffrée des différents paramètres macroéconomiques est donc le seul élément tangible sur lequel nous puissions véritablement nous appuyer pour révéler les hypothèses économiques sous-jacentes aux différents scénarios que nous avons retenus.

Nous nous proposons pour ce faire d'utiliser ici la décomposition dite de Kaya des émissions de CO₂ en le produit de quatre facteurs : intensité carbone de l'énergie primaire, intensité énergétique du PIB, PIB par tête et population. La décomposition (7.1) fournit en effet un moyen simple pour évaluer la contribution de facteurs de nature très différente aux émissions finales de CO₂ : dynamiques démographiques (POP), croissance économique générale (PIB/POP), structure de la demande énergétique induite et nature des technologies mises en œuvre pour la satisfaire (EP/PIB) et enfin part des énergies fossiles dans l'énergie primaire totale (CO₂/EP). Cette décomposition présente de plus l'intérêt de rattacher les émissions de CO₂ à des facteurs qui font individuellement l'objet d'études spécifiques, ce qui nous offre des points de comparaison très utiles.

$$\text{CO}_2 = \frac{\text{CO}_2}{\text{EP}} \frac{\text{EP}}{\text{PIB}} \frac{\text{PIB}}{\text{POP}} \text{POP} \quad (7.1)$$

Les différents facteurs qui composent (7.1) ne sont cependant pas totalement indépendants les uns des autres. Les liens entre la croissance économique et les dynamiques démographiques font ainsi l'objet d'une vigoureuse controverse parmi les démographes et les économistes. Leur indépendance n'est donc qu'une hypothèse parmi d'autres (Lutz *et al.*, 1996, Westoff, 1996). De même, le taux de croissance économique et l'intensité énergétique sont liés en ce qu'ils traduisent le caractère structurant à long terme du développement technique à long terme et de l'évolution des modes de consommation (Hourcade, 1990b).

L'identité dite de Kaya est donc une clé d'entrée pour examiner les déterminants principaux des émissions de CO₂ dans les scénarios étudiés, mais elle ne saurait constituer un test de validation de la cohérence interne des hypothèses de ces scénarios. Il faudrait pour ce faire reprendre les principales données du scénario et en tester la cohérence dans le cadre d'un modèle économique d'équilibre général, à l'image de ce qu'ont entrepris Hourcade, Chaabane et Helioui pour examiner les scénarios de la Conférence Mondiale de l'Energie (1992a). Une telle analyse dépasse cependant le cadre de notre propos dans ce chapitre.

b) Quelques éléments sur les données numériques utilisées

Pour les scénarios IS92 et IIASA&WEC, nous utilisons les chiffres issus de la base de données rassemblée par le SRES (Morita et Lee, 1997). Les chiffres relatifs aux scénarios IS98 proviennent du site internet mis en place par l'IPCC (<http://sres.ciesin.org>). Notons bien qu'il s'agit de données provisoires de juin 1999, qui sont encore susceptibles d'être modifiées avant l'approbation définitive des scénarios par le Groupe III du GIEC. Enfin, les données du scénario SGM97 nous ont été communiquées directement par Jae Edmonds et Ron Sands du Battelle Institute (novembre 1998).

En termes de contenu, les séries obtenues sont relativement homogènes. Toutes les projections, sauf SGM97 qui s'arrête à 2050, sont à l'horizon 2100. Le nombre de points de mesure entre 1990 et 2100 varie par contre fortement. Pour les scénarios IIASA&WEC ainsi que pour IS98 B1 et B2, nous avons un point tous les 10 ans. Pour les autres, nous n'avons que trois points intermédiaires en 2000, 2020 et

2050. Dans les graphiques qui suivent, nous avons choisi une représentation par pas de 10 ans. Les points manquants ont été calculés par interpolation linéaire. Toutes les données sont disponibles à la fois pour le monde entier et par régions. Le nombre de régions retenu est en général de l'ordre d'une dizaine, sauf pour les IS98 qui n'en comptent que quatre. Nous préciserons au fur et à mesure de la discussion la manière dont nous avons conduits les agrégations.

Du point de vue des unités, nous avons transposé l'ensemble des données dans le jeu d'unités suivant. Les populations sont exprimées en millions d'individus. Les PIB sont calculés à prix courants et exprimés en dollars 1990. Les consommations annuelles d'énergies primaires sont mesurées en milliards de tonnes équivalent pétrole par an (Gtep). Les émissions annuelles de CO₂ qui englobent ici l'utilisation des combustibles fossiles et la production de ciment sont enfin mesurées en milliards de tonnes de carbone¹³ (GtC). Par contre, les émissions de CO₂ issues des changements d'usage des sols (déforestation, changements d'itinéraires techniques agricoles, plantations, etc.) ne sont pas comptabilisées ici.

Une difficulté provient du fait que les différents scénarios retenus divergent pour l'année 1990. S'agissant des IS92, cette observation n'est pas pour nous surprendre. Comme nous l'avons noté au dessus, ces scénarios retiennent en effet des projections et non sur des statistiques définitives pour cette année de référence. Le fait que des travaux plus récents divergent entre eux est plus étonnant. Les écarts sont particulièrement sensibles pour l'énergie primaire (6%) et pour les émissions de CO₂ (14%), alors qu'ils restent faibles pour le PIB (3%) et la population (0,5%). Paradoxalement, ce sont les scénarios IS98 qui apparaissent les plus fragiles : ils sont non seulement incohérents entre eux, mais contribuent de plus pour une grande part aux divergences globales. Sans tenir compte de ces scénarios, la fourchette entre observation la plus haute et la plus basse recule ainsi à 5% pour l'énergie primaire et à 6% pour les émissions de CO₂.

Malgré ces différences, nous avons décidé ici de ne pas normaliser l'ensemble des données pour l'année 1990. Nous évitons ainsi la difficile question du choix d'une méthode de normalisation, et les risques de pertes d'information sur les données après 1990. Nous veillerons toutefois à conserver cette question en tête lorsque nous discuterons nos résultats, et en particulier ceux qui concernent la grandeur *a priori* la plus sensible, à savoir l'intensité carbone de l'énergie primaire. La publication prochaine de données normalisées sur les scénarios IS98 devrait nous permettre de travailler à l'avenir plus sereinement.

2.3. Analyse indicateur par indicateur

2.3.1. Population

a) Projections mondiales et régionales

La figure 7.5 présente une grande diversité de projections. La population mondiale en 2100 est en effet donnée entre 6,4 milliards (IS92c et d) et 17,5 milliards d'habitants (IS92f), soit un rapport de 1 à 2,7. Les scénarios s'organisent en trois groupes bien individualisés selon la date à laquelle la courbe « décroche » par rapport à une croissance linéaire :

- Le premier groupe commence à infléchir la croissance de la population dès 2020 pour terminer entre 6,4 et 7,5 milliards d'habitants en 2100 (IS98a1 et b1, IS92c et d). Ce groupe est le seul dans lequel la population se met finalement à décroître (au début de la seconde moitié du XXI^e siècle).

¹³ Rappelons que du fait de la masse molaire du carbone et de l'oxygène, une tonne de CO₂ produit $12/44 = 0,27$ tonnes de carbone.

- Un second groupe décroche de la croissance linéaire vers 2050 pour terminer à 2100 entre 10,4 et 11,3 milliards d'habitant (IS92a, b et e, scénarios IIASA & WEC et IS98b2). La population reste encore légèrement croissante en 2100.

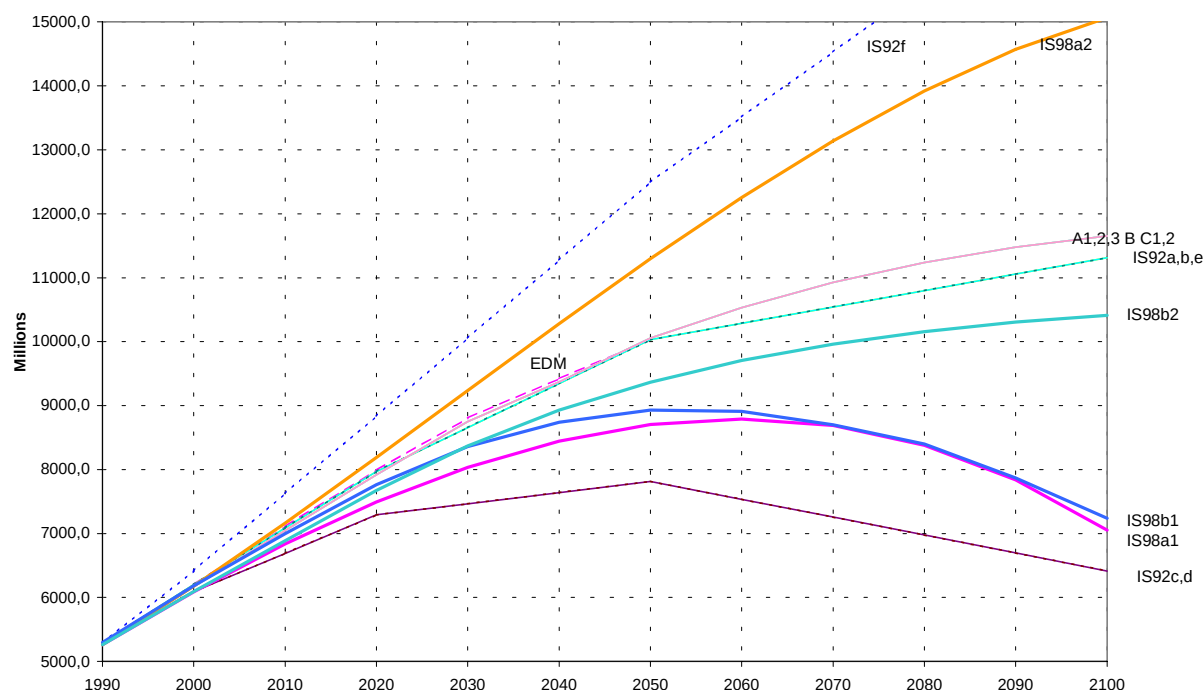


Figure 7.5 : Evolution de la population mondiale (en millions d'individus) dans les 17 scénarios étudiés

- Le troisième groupe enfin n'infléchit pratiquement pas une trajectoire de croissance quasi linéaire qui culmine entre 15,3 et 17,5 milliards d'habitants en 2100 avec un monde toujours en forte croissance démographique (IS92f et IS98a2).

Ces trois groupes correspondent à peu près aux projections Basses et Moyennes Basses des Nations Unies pour le premier, Moyennes pour le second et Moyennes Hautes pour le troisième (UN, 1998). Le scénario le plus élevé des Nations Unies, dans lequel la population croît jusqu'à près de 27 milliards d'habitants en 2100, n'est donc repris dans aucun des scénarios analysés ici.

Dans tous ces scénarios, c'est bien entendu dans les pays en voie de développement que se produisent les augmentations de population les plus massives, et où se situent les incertitudes déterminantes pour la taille globale de la population mondiale. Comparativement à la Chine et à l'Inde, l'Afrique et l'Amérique Latine comptent pour une part tout à fait importante dans la croissance globale de la population. Ainsi, dans les scénarios SRES, ces régions représentent aujourd'hui environ 30% de la population des pays non annexe B, contre 42% à 50% en 2100.

2.3.2. Croissance économique par tête

a) Au niveau mondial

L'évolution du produit mondial brut par tête dans chacun des scénarios est représenté sur la figure 7.6. Nous observons en premier lieu que les trajectoires de croissance mondiales sont toutes très lisses. Il s'agit d'une conséquence directe du fait que les modèles utilisés pour produire ces chiffres sont des modèles d'équilibre général fonctionnant avec des pas de temps très longs (de l'ordre de cinq à dix ans) qui gommant par nature les cycles économiques de court et moyen terme.

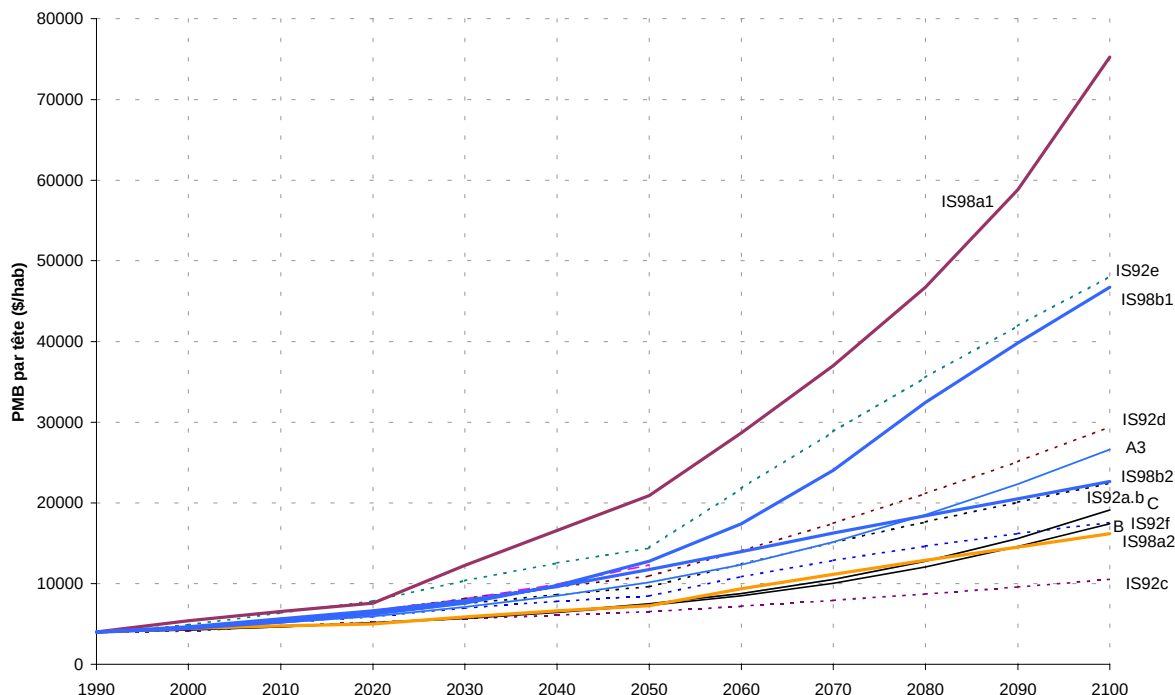


Figure 7.6 : Produit Mondial Brut par tête (en dollars 1990) pour les 17 scénarios étudiés. Les scénarios A1, A2 et A3 de l'IIASA&WEC présentent la même trajectoire de croissance (notée A sur la figure), de même pour les scénarios C1 et C2 (notée C). Les scénarios IS92 sont en traits pointillés, les scénarios IS98 en trait gras, les IIASA&WEC en trait fin. Le scénario SGM97 suit exactement IS98b1 jusqu'en 2050.

Les vitesses de croissance se révèlent par contre très différentes selon les scénarios. La figure 7.6 nous suggère qu'ils peuvent être regroupés en trois groupes principaux :

- Le premier groupe est de loin le plus nombreux. Il comprend en effet 13 scénarios dont les taux de croissance annuels moyens s'échelonnent entre 0,89% (IS92c) et 1,82% (IS92d). Le taux de croissance moyen de cet ensemble est de 1,49%, soit un taux très proche des taux historiquement observés depuis la fin du XIX siècle (Maddison, 1995). Ce premier groupe peut lui-même être divisé en trois sous-groupes :
 - Le premier sous-groupe comporte uniquement IS92c. La richesse mondiale produite atteint 10500\$ en 2100, soit approximativement le PIB par tête de l'Espagne en 1990. La richesse par tête est multipliée par 2,5 entre 1990 et 2100,
 - Le second comporte les scénarios A(1 à 3) et IS92d. Les taux de croissance atteignent 1,75%. La richesse par tête est alors multipliée par environ 6,5 pour atteindre environ 27000\$. Ce chiffre est légèrement supérieur au PIB par tête du Japon en 1990.
 - Entre les deux se trouvent pas moins de huit scénarios dont les taux de croissance se répartissent dans une fourchette de 1,27% à 1,58%. La richesse par tête atteint de 16190\$ et 22660\$, soit un facteur multiplicatif de 4 à 5,5. Ces chiffres correspondent à la fourchette des niveaux de vie européens en 1990 (16830\$ par tête en Italie, 22320\$ en Allemagne, source : World Bank, 1992).
- Le second groupe comporte trois scénarios dont les taux de croissance annuels par tête sont de l'ordre de 2,25% (IS98b1 et IS92e). Le scénario SGM97 suit une même trajectoire jusqu'en 2050. La richesse par tête atteint alors près de 45000\$ par tête, soit 11 fois plus qu'en 1990. Pour donner un ordre de grandeur, le PIB par tête de la Suisse était estimé à 32000\$ en 1990.

- Le troisième comprend enfin un unique scénario, IS98a1 qui présente un taux de croissance annuel moyen de 2,67%. Le PIB par tête est multiplié par 19 pour atteindre 75000\$.

L'écart de 1 à 3 sur les taux de croissance entraîne ainsi un écart considérable (de 1 à 7,3) sur la richesse par tête future. Cet écart n'est cependant que de 1 à 3,2 à 2050, et surtout de 1 à 1,6 à 2020. Cette observation suggère que l'incertitude est plus importante sur la croissance après la date de 2020. Le tableau 7.2 suivant confirme cette impression. Entre 1990 et 2020, les taux de croissance mondiaux se situent entre 0,72% et 2,28%, soit un rapport de 1 à 3,2. Entre 2020 et 2050, la fourchette passe de 0,75% à 3,39% soit un écart de 1 à 4,5. Cette augmentation pourrait n'être qu'une simple conséquence du fait que plus l'horizon est lointain, plus les incertitudes sont grandes. Mais la troisième colonne du tableau 7.2 nous montre qu'entre 2050 et 2100 l'écart se réduit à la fourchette 0,96%-2,60%, soit un ratio de 1 à 2,7 seulement.

	<u>Taux de croissance annuel moyen</u>			
	<u>1990-2020</u>	<u>2020-2050</u>	<u>2050-2100</u>	<u>1990-2100</u>
A1,2,3	1,34%	1,78%	1,93%	1,72%
B	0,82%	1,18%	1,74%	1,34%
C1,2	0,85%	1,26%	1,87%	1,42%
IS92a,b	1,52%	1,44%	1,69%	1,58%
IS92c	0,91%	0,75%	0,96%	0,89%
IS92d	1,72%	1,67%	1,98%	1,82%
IS92e	2,28%	2,02%	2,41%	2,27%
IS92f	1,35%	1,19%	1,45%	1,35%
IS98a1	2,14%	3,39%	2,56%	2,67%
IS98a2	0,72%	1,26%	1,60%	1,27%
IS98b1	1,49%	2,40%	2,60%	2,24%
IS98b2	1,70%	1,89%	1,32%	1,58%
SGM97	1,72%	2,06%	n.a.	n.a.

Tableau 7.2 : taux de croissance annuels moyen par périodes dans les différents scénarios de référence.

Nous pouvons ainsi identifier trois types de profils temporels de croissance. Le premier, que nous pouvons qualifier de « progressif » voit le taux de croissance augmenter continûment durant les trois périodes considérées (tous les scénarios IIASA&WEC, IS98a2 et IS98b1). Le second, « explosif » voit le taux de croissance devenir très élevé entre 2020 et 2050 avant de diminuer ensuite de manière importante jusqu'à la fin du siècle (IS98a1 et b2). Le troisième, « étale », voit le taux de croissance rester à peu près stable sur les trois périodes, avec une légère diminution entre 2020 et 2050 (tous les IS92). De part son comportement initial, SGM97 appartient quant à lui soit à l'une des deux premières catégories.

La correspondance étroite entre la famille du scénario et le profil temporel de croissance constitue un argument de choix pour défendre l'utilisation de scénarios d'origines multiples dans les modèles d'évaluation des politiques climatiques. Non pas que l'une de ces trajectoires soit plus probable qu'une autre. Même la prolongation exponentielle d'un taux de croissance uniforme sur tout le XXI^e siècle qui sous tend manifestement les scénarios IS92 n'a pas à être rejetée *a priori* du fait de sa simplicité. Par contre, le fait d'avoir une croissance très importante entre 2020 et 2050 ou entre 2050 et 2100 change considérablement la nature du timing des politiques climatiques qu'il est possible de mettre en œuvre. Etant données les irréversibilités environnementales, ce décalage temporel demande pour le moins un examen sérieux. Dans ce contexte, la présence des scénarios IS98 dans deux catégories différentes rassure quant à la possibilité pour un « processus ouvert » de ne pas déboucher sur un consensus trop étroit.

b) Taux de croissance régionaux

Passer du niveau global au niveau régional permet d'entrevoir les variables clés pour la différenciation des scénarios. Notons tout d'abord dans tous les scénarios, les taux de croissance des pays hors de l'annexe I sont supposés plus élevés que les taux de croissance des pays de l'annexe I, et ce quelle que soit la période considérée. L'écart des taux de croissance annuels moyens entre ces deux régions se révèle supérieur à 1% quel que soit le scénario considéré. Ce chiffre ne signifie pas pour autant qu'il y ait rattrapage des pays du Nord par les pays du Sud. Le PIB par tête moyen dans les pays de l'annexe I est dans presque tous les scénarios supérieur à trois fois le PIB par tête moyen dans les pays hors annexe I. Seuls IS92e (ratio de 1 à 2,7), IS98a1 (ratio de 1 à 1,6) et IS98b1 (de 1 à 1,5) font exception.

Au sein des pays non annexe I, la croissance est d'abord tirée par la Chine, dont le poids démographique et les taux de croissance du PIB par tête très élevés (compris entre 4% et 6% dans tous les scénarios sauf IS98b1 entre 1990 et 2020) font très vite un poids lourd économique pour le siècle prochain. Dans tous les scénarios, la Chine voit son PIB par tête multiplié par un chiffre huit à douze fois plus grands que celui des USA ou de l'Europe de l'Ouest, soit pour le scénario IS92a par exemple un différentiel de taux de croissance de 2 points par an pendant tout le siècle prochain.

Pour les autres pays hors de l'annexe I, la situation est plus contrastée. L'Inde et l'Asie du Sud est en général sont supposés suivre la croissance de la Chine dont elles prennent le relais, mais avec des taux plus faibles, au moins dans les scénarios IS92 et IIASA&WEC dans lesquels les données permettent de les isoler. Seul le scénario SGM97 présente une quasi stagnation de l'Inde par rapport à la Chine jusqu'en 2050, dont l'explication ne nous apparaît pas évidente. L'Afrique ou l'Amérique Latine observent des taux de croissance plus faibles, avec un multiplicateur de leur PIB par tête environ deux à cinq fois plus élevé que celui des USA ou de l'Europe de l'Ouest. Prolonger pendant toute la durée du siècle prochain le différentiel observé aujourd'hui entre croissance en Asie et croissance en Amérique Latine ou en Afrique est *a priori* discutable, et il serait intéressant d'examiner les conséquences en termes climatiques d'un scénario alternatif avec ralentissement des pays d'Asie et de décollage de l'Amérique Latine et de l'Afrique.

Au sein de l'annexe I, les incertitudes concernent principalement l'Europe de l'Est et la Russie. La succession des scénarios permet ainsi de suivre la prise de conscience de la réalité de la situation économique dans ces pays¹⁴. Dans les IS92, le PIB par tête en Russie et en Europe de l'Est en 1990 est de 8830\$. Dans les scénarios de l'IIASA et du WEC publiés trois ans plus tard, il n'est plus que de 2460\$, chiffre repris par les IS98. Paradoxalement, IS92a et A1 par exemple aboutissent en 2100 à des PIB par tête finalement assez proches : le scénario de l'IIASA postule en effet un rattrapage très important entre 2020 et 2050 puis, mais de manière moins rapide, entre 2050 et 2100. Ce mécanisme se retrouve dans l'ensemble des scénarios que nous avons étudiés. Du point de vue de la croissance mondiale totale, l'incertitude sur la croissance de l'ex-URSS joue finalement assez peu. En ce sens, les scénarios IS92 ne sont pas disqualifiés par leur point de départ pour ce pays. Dans l'optique d'un marché de permis d'émissions négociables dans lequel la Russie pourrait être le vendeur principal, la question prend une toute autre importance. Nous y reviendrons au chapitre suivant.

Terminons ce tour d'horizon par les pays de l'OCDE, pour lesquels les incertitudes relatives sont plus faibles¹⁵. Nous noterons simplement que tous les scénarios qui détaillent les pays de l'annexe I (ici tous sauf les scénarios du SRES) donnent en effet un léger avantage à l'Europe, qui est supposée se développer un peu plus rapidement que les USA. Le différentiel n'est pas très important, un ou deux dixièmes de points de croissance annuels tout au plus, mais sa présence récurrente a de quoi surprendre.

Au final, il apparaît que les trajectoires de croissance régionales sont qualitativement assez proches. Le paramètre le plus important apparaît finalement être le taux de croissance global, qui est décliné de

¹⁴ Le GIEC étant une instance intergouvernementale, il est aussi possible que des considérations diplomatiques aient conduit à proposer des chiffres aussi élevés.

¹⁵ Mais leur impact sur la croissance globale est plus fort.

manière quasi homothétique en des composantes régionales. Un examen plus détaillé des trajectoires régionales qui dépasse le cadre de cette thèse se révélerait ici nécessaire, afin de réaliser le cas échéant la construction de variantes des scénarios étudiés capables de tester l'impact de dynamiques régionales très différentes (stagnation à long terme de la Russie, émergence plus rapide de l'Afrique et de l'Amérique Latine à partir de 2020, etc.).

c) Liens entre PIB par tête et population

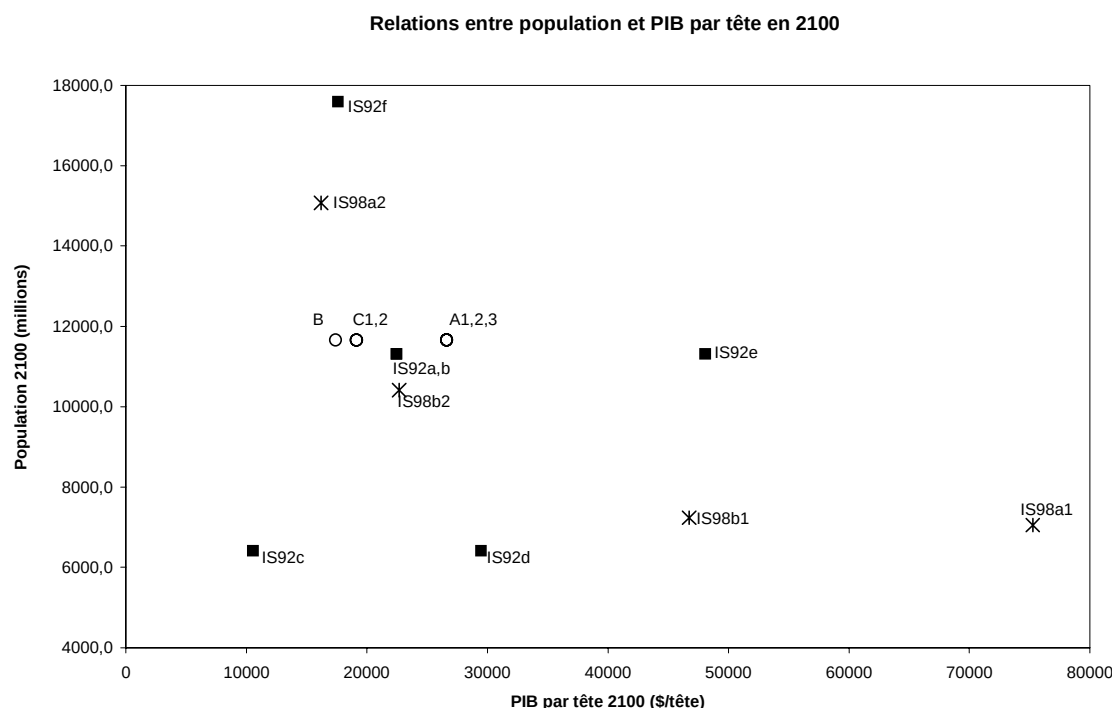


Figure 7.7 : Relation entre PIB par tête 2100 (en abscisse) et population en 2100 (ordonnée) pour les scénarios IS92 (carrés noirs), IIASA&WEC (cercles blancs) et IS98 (croix).

La figure 7.7 positionne chacun des scénarios dans le plan PIB par tête en 2100 – population en 2100. Les liens entre niveaux de population et richesse par tête apparaissent ainsi clairement. Les scénarios de l'IIASA et du WEC présentent tous par construction la même dynamique de la population (Nakić enović *et al.*, 1998). Le faible écart entre les PIB par tête finaux dans les différents scénarios étudiés valide *a posteriori* le bien fondé de cette hypothèse simplificatrice. Le cas des IS92 est tout autre. Les variables population et PIB par tête sont volontairement considérées comme indépendantes. La figure 7.7 illustre bien la position « centrale » des scénarios IS92a et b par rapport aux quatre variantes extrêmes que constituent IS92c à f.

La famille des IS98 est la seule qui prenne véritablement partie sur la question en assumant une relation négative entre croissance de la population et croissance économique. Cette relation peut être estimée pour l'année 2100 correspondant à la figure à l'aide du modèle exponentiel (7.2) suivant.

$$POP_{2100} = A \cdot \left(\frac{PIB_{2100}}{POP_{2100}} \right)^{\gamma} \text{ estimé avec } \gamma = -0,485 \text{ (R}^2=0,889\text{)} \quad (7.2)$$

Cette relation phénoménologique ne saurait traduire à elle seule de relation de causalité entre les variables PIB par tête et POP. La lecture des synopsis résumant les quatre scénarios IS98 suggère néanmoins que les auteurs ont explicitement pris le parti de représenter un impact négatif de la croissance économique sur la fertilité : plus les gens deviennent riches, plus la transition démographique dans les pays en voie de développement se produit tôt.

La corrélation moyenne obtenue au dessus illustre cependant le fait que ce mécanisme n'est pas le seul à l'œuvre. Le système de valeurs de référence joue aussi un grand rôle. En premier lieu, le scénario d'ouverture (1) est supposé correspondre à des valeurs moins natalistes que (2). En second lieu, la préoccupation écologique et sociale des scénarios B est supposée suffisamment forte pour que les individus aient des comportements aboutissant à limiter la démographie au nom de la protection du bien commun (SRES, 1999b). Le fait que les deux scénarios B (b1 et b2) soient en dessous de la courbe (7.2) peut s'interpréter comme la traduction de ce mécanisme.

2.3.3. Intensité énergétique

L'intensité énergétique, c'est-à-dire la quantité d'énergie primaire demandée par unité de PIB, est un indicateur agrégé qui reflète à la fois : (i) la consommation en énergie finale des technologies qui permettent de produire un bien ou un service donné, (ii) le rendement des technologies permettant de passer de l'énergie primaire à l'énergie finale, (iii) le panier énergétique utilisé pour satisfaire les besoins finaux des usagers et (iv) la structure de la demande de biens et services incorporant plus ou moins d'énergie par unité de PIB, c'est à dire *in fine* les styles de vie et la nature des activités économiques.

L'amélioration de l'intensité énergétique au cours du temps reflète donc à la fois l'amélioration des rendements du fait du progrès technique, mais aussi les transformations structurelles des systèmes énergétiques, des activités économiques comme des styles de vie. Cette double origine des progrès en matière d'intensité énergétique permet d'expliquer à la fois le fait que cet indicateur décroît historiquement à un taux régulier de 1% par an depuis 1800 (Nakićenović, 1987) et que subsistent des disparités importantes même entre pays de niveau de développement comparables (les USA sont par exemple à 0,40 tep/1000\$ en 1990 contre 0,20 tep/1000\$ pour le Japon).

Schipper *et al.* (1999) émettent cependant des doutes sur la pertinence de cet indicateur pour aider à la décision publique. Ces auteurs prônent au contraire une analyse très désagrégée de la composition des besoins énergétiques de chacun des secteurs considérés. Ils distinguent ainsi les effets technologiques des effets de structure qui expliquent la dynamique des émissions de gaz à effet de serre. Nous retiendrons ici l'idée selon laquelle à peu près 50% des différences d'émissions entre les pays peuvent être expliqués par des questions structurelles (géographie et comportements, nature des activités économiques principales) et que le reste provient à la fois de la nature du système énergétique et des technologies utilisées. Nous nous contenterons par contre d'utiliser ici une analyse à base d'indices d'efficacité énergétique globaux qui se révèlera suffisante pour comparer les différents scénarios de référence entre eux.

La distribution des trajectoires d'intensité énergétique mondiales représentée sur la figure 7.8 apparaît relativement homogène. L'intensité énergétique en 2100 varie entre 0,06 tep pour 1000\$ de PIB (IS98b1) à 0,19 tep pour 1000\$ (IS92c) soit un rapport de 1 à 3,3 (valeur en 1990 : 0,40). Il est à nouveau possible de regrouper les scénarios en groupes, même si les frontières sont ici moins nettes :

- Dans le premier groupe, l'intensité énergétique diminue rapidement pour terminer entre 0,06 et 0,07 en 2100 (scénarios SGM97 jusqu'en 2050, IS98b1, C1 et C2). On peut rattacher à ce groupe le scénario IS98a1 bien qu'il décroisse moins vite à partir de 2070 (valeur finale : 0,09).
- Dans le second, qui comprend tous les autres scénarios, l'intensité énergétique diminue moins rapidement pour atteindre de 0,10 à 0,19 en 2100.

La présence de scénarios aussi différents qu'IS98a1 et b1 d'une part et C1 et C2 de l'autre aux niveaux d'intensité énergétiques les plus faibles mérite une explication. Outre le progrès technique autonome, les scénarios C1 et C2 sont construits sur la base de politiques d'économies d'énergie vigoureuses fondées entre autre sur des taxes importantes. IS98a1 représente un cas polaire : un développement économique très important est supposé se traduire naturellement par une diminution plus rapide de

l'intensité énergétique du fait d'un progrès technique très rapide.¹⁶ Le scénario IS98b1 représente une manière d'intermédiaire : la croissance du PIB est plus rapide que dans C1 et C2, mais subsiste une orientation économe en énergie qui fait plus que compenser le progrès technique moins important que dans IS98a1 du fait d'un taux de croissance plus faible.

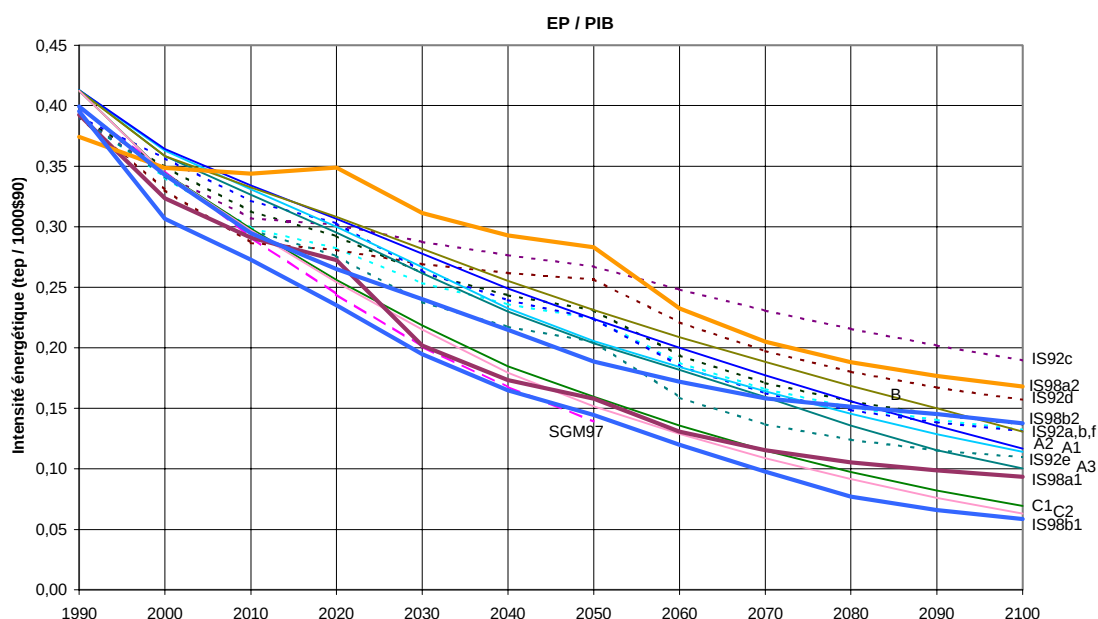


Figure 7.8 : Evolution des intensités énergétiques (en tep/1000\$90) pour les 17 scénarios retenus.

2.3.4. Contenu carbone de l'énergie primaire

Le ratio émissions de CO₂ sur consommation d'énergie primaire traduit d'abord la nature des énergies primaires utilisées dans l'économie. A panier énergétique donné, les rendements de transformation entre énergie primaire et énergie finale des technologies affectent aussi ce ratio, mais dans des proportions moindres¹⁷. La figure 7.9 montre une forte dispersion de cet indicateur à 2100 entre 0,13 tC/tep (scénario C1) et 0,68 tC/tep (IS98a2), soit une fourchette de 1 à 5,2. Même si l'absence d'harmonisation des données 1990 accentue certainement cet écart, il n'en traduit pas moins de fortes incertitudes portant à la fois sur la nature des technologies ultimes à long terme et sur les réserves de combustibles fossiles. A l'appui de cette hypothèse, remarquons que le ratio CO₂ sur énergie primaire est le seul indicateur pour lequel les scénarios IIASA&WEC recouvrent l'ensemble de la fourchette. Or les différences entre les scénarios de cette famille tiennent précisément aux hypothèses sur les réserves fossiles et aux possibilités techniques à très long terme.

Les scénarios IS92 se regroupent en deux groupes nettement distincts. Le premier (IS92a,b,e,f) postule une décroissance lente du contenu carbone de l'énergie primaire (aux alentours de 0,60 tC/tep en 2100 contre 0,73 en 1990 dans ces scénarios). Les deux scénarios restant (IS92c et d) se distinguent au contraire par une diminution très rapide de ce ratio qui atteint environ 0,35 tC/tep en 2100. Les préférences pour l'environnement nécessaires pour justifier un recours massif aux énergies renouvelables dans des scénarios caractérisés à la fois par des taux de croissance économique faibles ou moyens et par des hypothèses démographiques très basses demandent cependant à être explicitées.

¹⁶ Une autre interprétation possible de la baisse de l'intensité énergétique de IS98a1 est de supposer que les activités sur lesquelles se fonde la croissance économique sont par nature moins consommatrices d'énergie. Des études récentes (Romm *et al.*, 1999) suggèrent en effet que le développement des technologies de l'information pourraient permettre une diminution importante de la consommation d'énergie pour quantité de services. Etant données les informations dont nous disposons sur les scénarios IS98, il ne nous est pas possible de distinguer ici l'influence de ces deux facteurs.

¹⁷ Le ratio énergie finale sur énergie primaire est très proche dans tous les scénarios étudiés (entre 0,60 et 0,91 à 2100, soit une fourchette de 1 à 1,3).

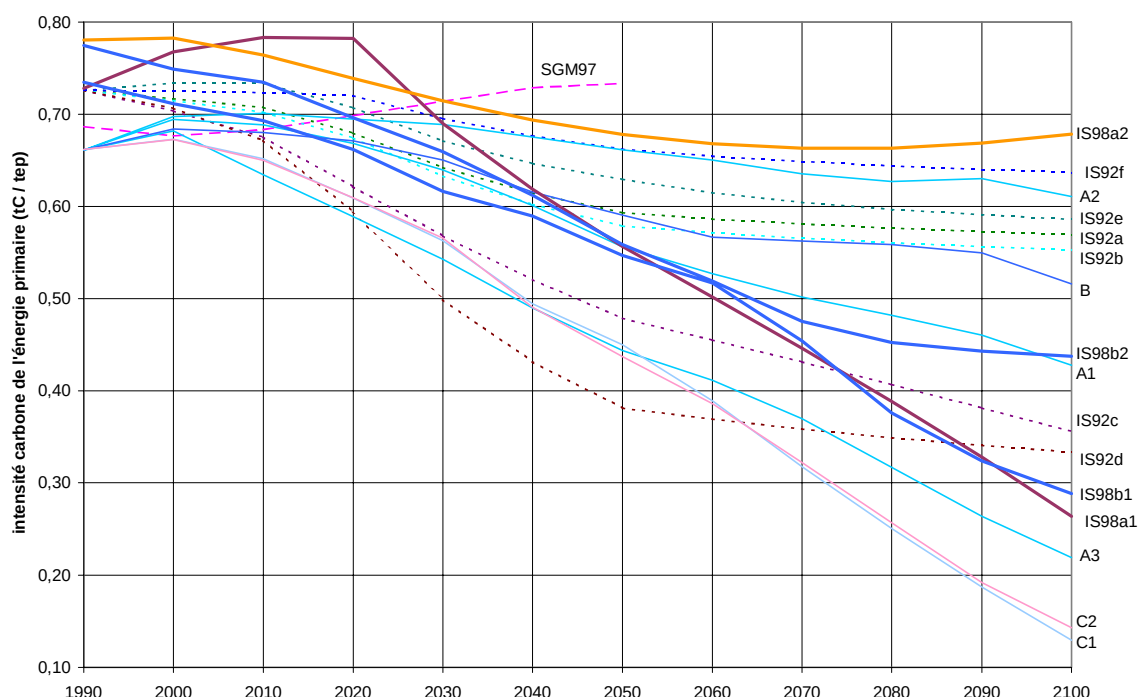


Figure 7.9 : Evolution des émissions de CO₂ par quantité d'énergie primaire (en tonnes de carbone par tep). Les scénarios IS92 sont en traits pointillés, les IS98 en trait gras et les IIASA&WEC en traits fins.

L'examen des trajectoires IS98 permet de mieux cerner les hypothèses implicites derrière ces scénarios. En premier lieu, plus le PIB par tête est élevé, plus l'intensité carbone diminue (de IS98a2 à IS98a1). Nous interprétons ces chiffres comme traduisant le fait que le moteur principal de la diminution de l'intensité carbone est le progrès technique sur les énergies renouvelables, progrès technique supposé ici d'autant plus important que la richesse par tête est élevée.

L'intérêt pour l'environnement apparaît comme un second facteur explicatif. L'écart entre IS98a2 et IS98b2 apparaît ainsi plus grand qu'entre IS98b2 et IS98b1 : passer de IS98a2 à IS98b2 se traduit en effet à la fois par une augmentation de la richesse et par une augmentation de l'intérêt pour l'environnement. Par contre les scénarios IS98a1 et IS98b1 ont au final les mêmes intensités carbone : la baisse de l'intérêt pour l'environnement liée au passage de b1 à a1 est compensée par la hausse du revenu par tête. Notons par contre que la transition vers des énergies non fossiles se produit plus tard dans IS98a1 que dans IS98b1 : elle résulte en effet de l'accumulation des richesses et des technologies et non comme dans IS98b1 d'un choix politique assumé dès le départ.

Dans cet ensemble, le scénario SGM97 apparaît assez atypique en ce qu'il postule une augmentation soutenue de l'intensité énergétique jusqu'en 2050. Or il se trouvait au contraire dans le bas de la fourchette en matière d'intensité énergétique. Nous avons donc la description d'un monde relativement riche, dont la valeur ajoutée demande peu d'énergie, mais dont le système énergétique reste principalement fondé sur les énergies fossiles. Sans remettre en cause cette image (dont la traduction régionale demande cependant à être examinée de près, en particulier pour l'amélioration de l'intensité énergétique de la Chine), il est important d'en souligner la fragilité : si pour une raison ou pour une autre l'efficacité énergétique ne s'améliorait pas autant que le scénario le suggère, le coût en termes d'émissions serait immédiat.

2.3.5. Trajectoires d'émissions de gaz à effet de serre

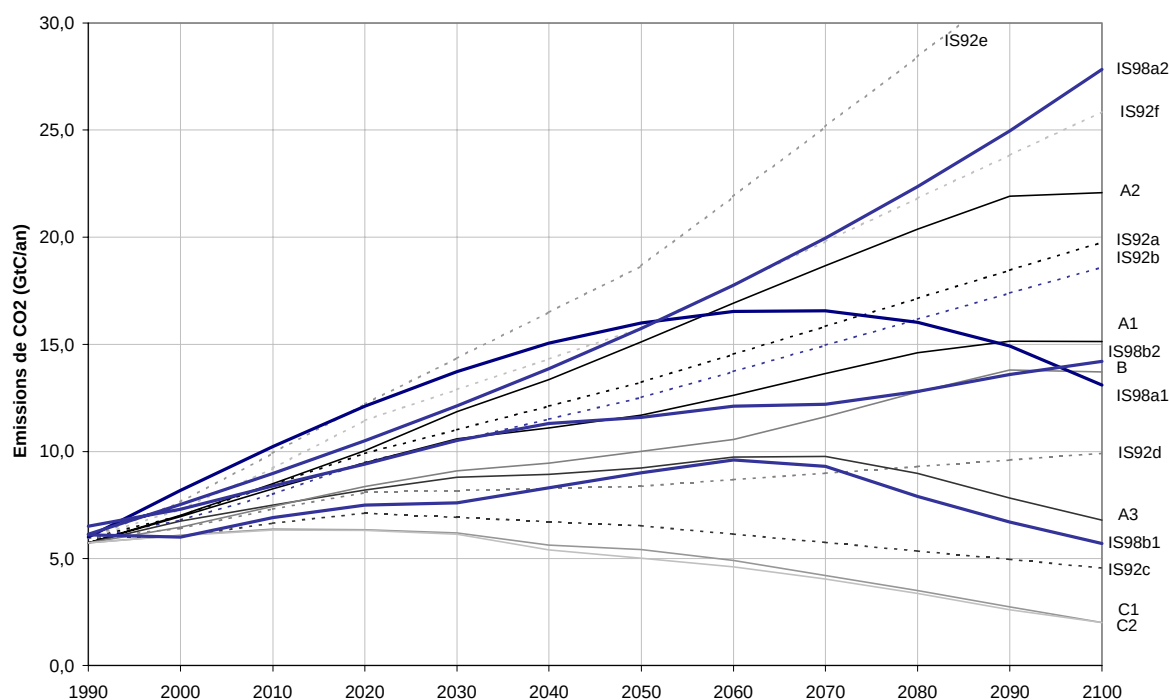


Figure 7.10 : Evolution des émissions de CO₂ (GtC par an) dans les différents scénarios étudiés. Le scénario SGM97 suit à peu près la trajectoire de IS92b jusqu'en 2050.

La figure 7.10 montre les trajectoires d'émissions de CO₂ mondiales données par les différents scénarios. Nous observons en premier lieu une dispersion très importante des trajectoires : entre 6,3 et 10,2 GtC/an en 2010, entre 5 et 18,6 GtC/an en 2050 et entre 2 GtC/an et 34,8 GtC/an en 2100 (soit un écart de 1 à 17).

Les scénarios IS98 se distinguent particulièrement en introduisant la possibilité d'une décroissance des émissions d'ici à l'horizon 2100. Les scénarios IS92c, C1, C2 et A3 présentent certes eux aussi une telle configuration, mais celle-ci résulte soit de perspectives très sombres sur la croissance économique et démographique (IS92c), soit d'une politique volontariste de transition vers des énergies non fossiles (C1 et C2). A l'inverse, IS98a1 et b1 présentent un taux de croissance élevé : c'est donc le progrès technique seul (dans IS98a1) ou la combinaison entre progrès technique plus faible et une plus forte conscience écologique (IS98b1) qui permet d'infléchir la trajectoire d'émissions.

La répartition régionale de ces émissions se révèle particulièrement intéressante. La figure 7.11 montre que la majorité des projections prévoient une stabilisation des émissions de l'annexe I dès le milieu du siècle prochain. Seuls les scénarios présentant des dynamiques explosives non compensées (croissance économique pour IS92e, croissance démographique pour IS92f ou IS92a2) ou une croissance économique élevée doublée d'une économie exclusivement charbonnière (A2) font exception à cette règle. Quatre scénarios projettent des émissions I constantes dans l'annexe I d'ici 2100 (IS92a et b, A1 et IS98b2), et les huit autres projettent une baisse des émissions de CO₂ de l'annexe B à l'horizon 2100. L'écart entre la prévision la plus haute et la prévision la plus basse est alors de 11 GtC par an. Il est intéressant de noter que cet écart est déjà conséquent en 2050 (7 GtC), en 2020 (4,3 GtC) et même en 2010 (1,8 GtC).

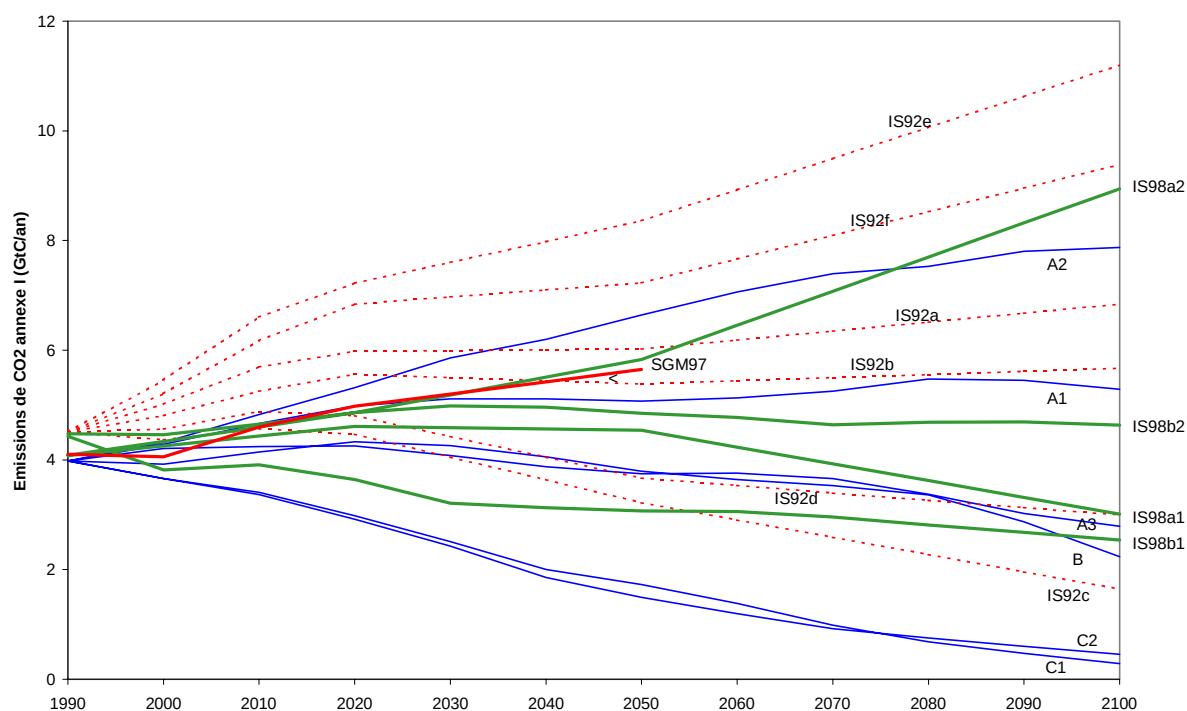


Figure 7.11 : Emissions de CO₂ fossiles des pays de l'annexe I. Les scénarios IS92 sont représentés en pointillés, les IS98 en traits gras et les IIASA&WEC en traits fins.

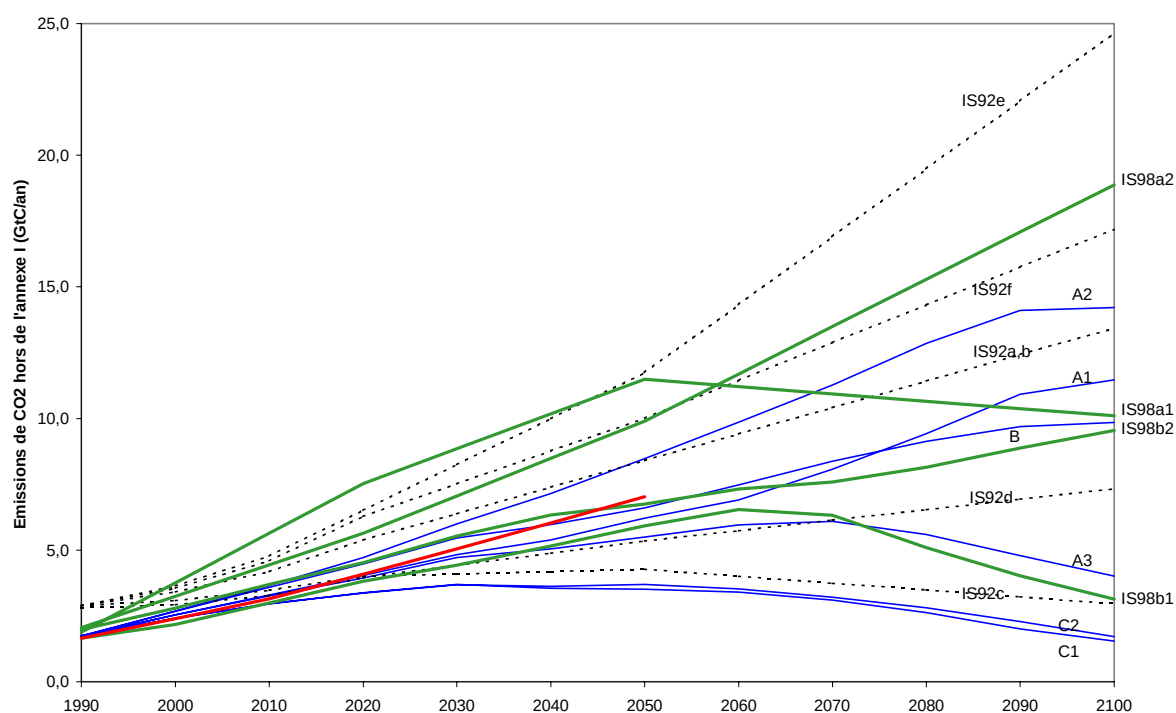


Figure 7.12 : Emissions de CO₂ fossiles des pays non annexe I. Les scénarios IS92 sont représentés en pointillés, les IS98 en traits gras et les IIASA&WEC en traits fins.

Pour les pays hors de l'annexe B, les scénarios projettent très majoritairement une croissance rapide et soutenue des émissions d'ici à la fin du siècle prochain. Seuls les scénarios fortement interventionnistes (C1, C2, A3), portant des hypothèses très pessimistes sur la population comme sur la croissance économique (IS92c) ou entrevoyant un progrès technique très important (IS98a1 ou

IS98b1) projettent une stabilisation à l'horizon 2050 puis une diminution des émissions hors annexe I. Le scénario IS98a1 présente néanmoins un niveau d'émissions entre 1990 et 2050 parmi les plus élevés : nous observons ici typiquement une phase d'accumulation du capital et du progrès technique, permettant ensuite d'envisager une transition rapide vers des énergies non fossiles.

Les écarts entre le scénario le plus émetteur et le scénario le moins émetteur s'établissent ici à 2,5 GtC en 2010, 4 GtC en 2020, 7,5 GtC en 2050 et 23 GtC en 2100. Il existe ainsi deux périodes bien distinctes quant aux incertitudes sur les émissions : pendant la première, qui recouvre grossièrement la première moitié du XXI^e siècle, l'incertitude sur les émissions du Sud comme sur celles du Nord est à peu près du même ordre de grandeur. Lors de la seconde période par contre, l'incertitude sur les pays en voie de développement devient prépondérante par rapport à l'incertitude sur les émissions des pays du Nord.

Au sein de ces émissions, la part de l'Asie du Sud-Est est prépondérante. La Chine et l'Inde représentent ainsi à elles seules plus de 60% des incertitudes sur les émissions des pays hors de l'annexe I. Pour donner un autre point de comparaison, la fourchette des émissions en 2100 pour ces deux pays est aussi grande que celle qui concerne l'ensemble de l'annexe I.

Intéressons-nous enfin au cas de l'Asie du Sud-Est (figure 7.13) dont les émissions proviennent essentiellement de la Chine et de l'Inde. Ces deux pays représentent à eux seuls plus de 60% des incertitudes sur les émissions des pays non annexe B. Pour donner un autre point de comparaison, l'écart entre le scénario le plus émetteur et le scénario le moins émetteur pour la Chine et l'Inde en 2100 est égal à celui observé pour l'annexe B dans son ensemble.

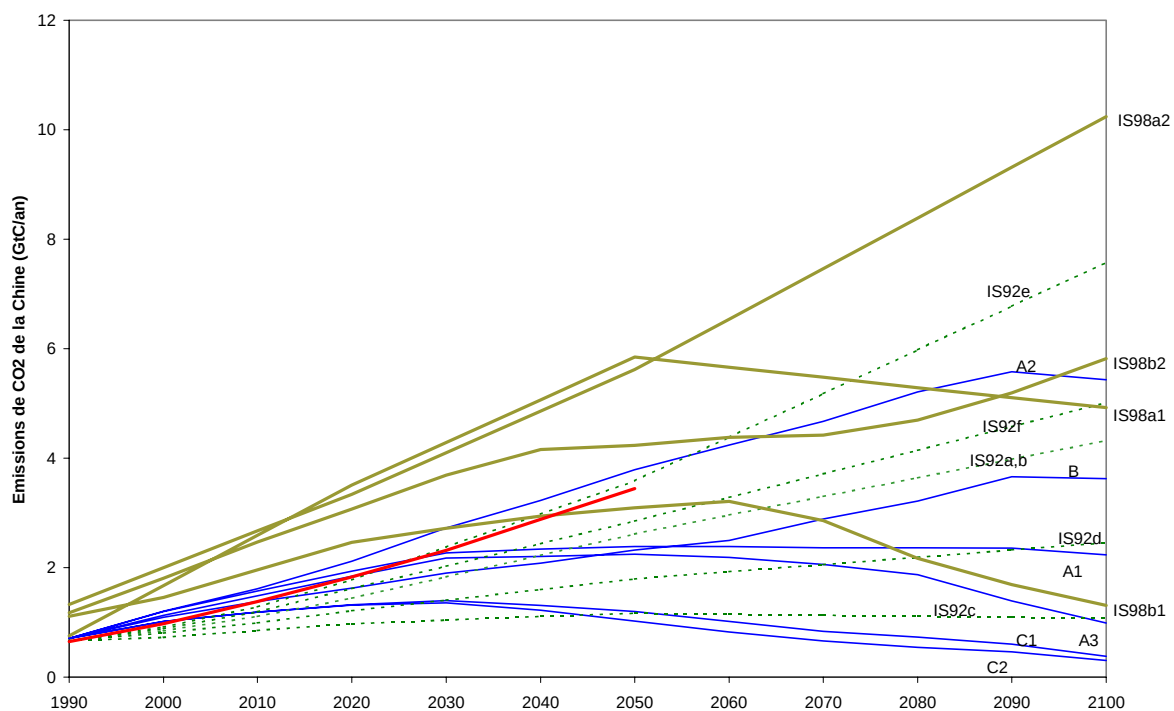


Figure 7.13 : Emissions de CO₂ fossiles de la Chine (GtC par an). Les données représentées sont relatives à la Chine et aux pays à économies dirigées d'Asie (Cambodge, Laos, Viet-Nam, Chine, Corée du Nord, Mongolie) et à Hong Kong, sauf pour les scénarios IS98 où elles sont relatives à l'ensemble de l'Asie (aucune décomposition régionale plus fine n'est disponible pour ces scénarios) sauf pour le scénario SGM97, où elles sont relatives à la seule Chine. Les IS92 sont en traits pointillés, les IS98 en trait gras et les scénarios IIASA&WEC en traits fins.

2.3.6. Trajectoires de concentration

Examinons pour finir les trajectoires de concentration de CO₂ atmosphériques dans l'atmosphère. Ces données n'étant pas fournies avec la base de donnée du SRES, nous les avons recalculées à l'aide du modèle de passage émissions – concentrations développé au chapitre 1 (section 2.2.1). Les trajectoires d'évolution de la concentration de CO₂ obtenues (figure 7.14) montrent une grande variabilité des qualités environnementales à long terme. Le niveau de concentration à 2100 s'échelonne en effet entre 450 ppm (scénarios C1 et C2) et 850 ppm (IS92e). Nous remarquons cependant que tous ces scénarios dépassent à un moment ou à un autre de la trajectoire le seuil de 450 ppm.

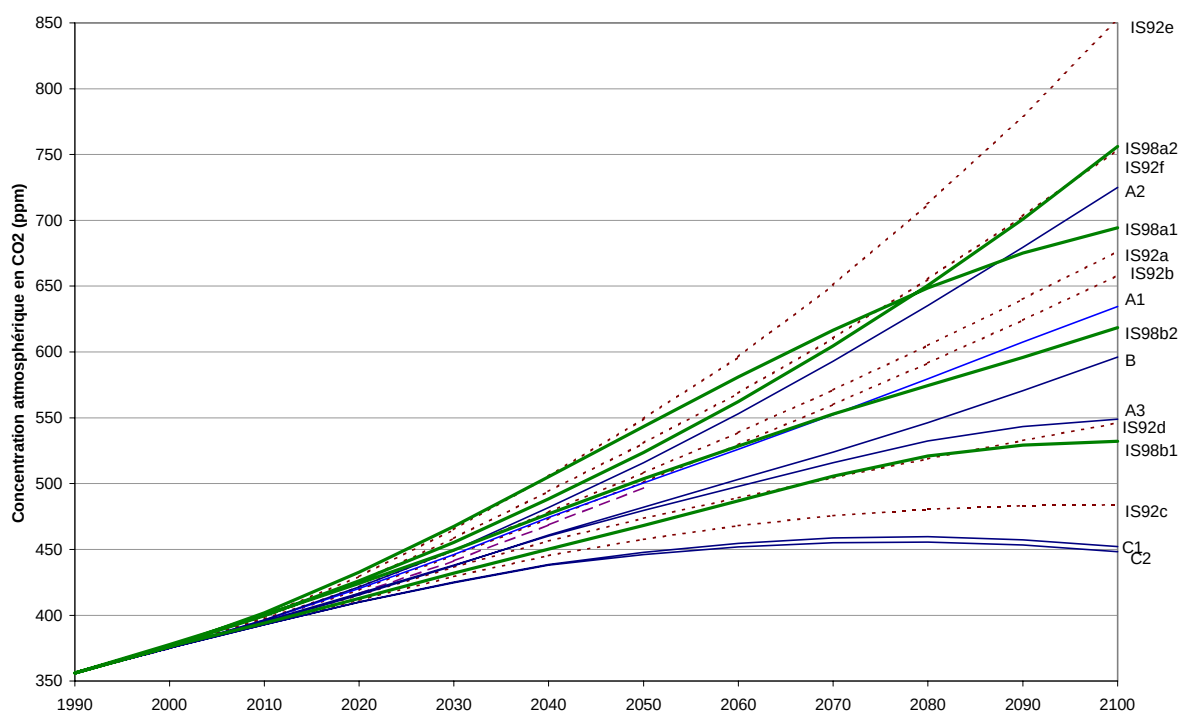


Figure 7.14 : Evolution des concentrations atmosphériques en CO₂ dans l'atmosphère (en parties par millions) obtenues sur la base du modèle climatique de Nordhaus (chapitre 1, section 2.2.1). Les trajectoires IS92 sont en pointillés, les IS98 en gras et les IIASA&WEC en traits fins. La trajectoire SGM97 est représentée en grands pointillés jusqu'en 2050.

Il existe de plus une nette distinction entre les six scénarios fortement interventionnistes (C1 et 2, IS92c et d, A3, IS98b1 et IS98b2) et les autres. Les premiers permettent en effet de contenir la concentration à 2100 entre 450 et 550 ppm (sauf pour IS98b2), et surtout de quasi stabiliser (sauf pour IS98b2 et IS92d) cette variable. Les autres conduisent à l'inverse à des concentrations supérieures à 650 ppm en 2100 avec une tendance toujours à la hausse. IS92e excepté, la concentration moyenne pour ces scénarios majoritairement non interventionnistes s'établit à 679 ppm.

2.4. Eléments d'une synthèse par famille de scénarios

Le tableau 7.3 résume les taux de croissance entre 1990 et 2100 des quatre composantes des émissions de CO₂ distinguées dans l'identité dite de Kaya pour chacun des 17 scénarios étudiés : population, PIB par tête, intensité énergétique et intensité carbone de l'énergie primaire. La partie droite du tableau situe ces chiffres par rapport à la moyenne de l'ensemble des scénarios, et permet ainsi de visualiser les caractéristiques relatives de ces différentes projections. Rappelons cependant ici que la moyenne pour tous les scénarios n'a aucune signification en termes de probabilité d'occurrence : le scénario « moyen » n'a pas *a priori* plus de chances de se produire qu'un autre (Alcamo *et al.*, 1994). Et nous constatons de toute manière qu'un tel scénario n'existe pas : pas plus IS92a qu'un autre ne présentent

en effet des caractéristiques seraient toutes proches de la moyenne des scénarios que nous avons étudiés. Quel que soit donc la manière de prendre le problème, le tableau 7.3 nous ramène donc au constat déjà souligné au départ : devant la diversité des futurs possibles, il est nécessaire de raisonner sur la base de plusieurs et non d'une seule trajectoire de référence.

a) Famille des IS92

Passons maintenant à une analyse par famille de scénarios. En ce qui les IS92, notre analyse permet de mettre en évidence une très forte dispersion des hypothèses au sein de ce groupe de scénario. Si IS92a est considéré comme le scénario de base de cette famille, les IS92c à f apparaissent comme des variantes fondées sur des hypothèses extrêmes dont la cohérence demande à être assurée :

- La trajectoire démographique d'IS92c et IS92d apparaît particulièrement faible. A la limite, IS92c peut être interprété comme un monde « égoïste » dans lequel chaque génération investit peu et fait très peu d'enfants, ce qui pose cependant la question du réalisme d'une transition démographique très rapide dans les pays en voie de développement avec un taux de croissance faible. En outre, les raisons pour lesquelles l'intensité carbone diminuerait alors plus vite que dans IS92a ne sont pas claires : s'il s'agit d'une transition vers des énergies non fossiles, par quoi est-elle motivée ?
- IS92d apparaît de ce point de vue un peu plus cohérent, puisque le taux de croissance élevé peut être invoqué pour expliquer à la fois la baisse de la population et la baisse de l'intensité carbone, si nous supposons toutefois que le progrès technique est orienté principalement vers le développement d'énergies non fossiles. L'élasticité richesse de la croissance démographique calculée entre IS92a et IS92d apparaît cependant particulièrement élevée.
- IS92e est quant à lui un scénario de forte croissance entraînant une diminution moyenne de l'intensité énergétique et surtout une diminution très faible de l'intensité carbone de l'énergie primaire. La demande énergétique qui accompagne cette forte croissance est donc supposée pouvoir être entièrement satisfaite par les énergies fossiles. Nous sommes ainsi dans une situation similaire à celle de A2, mais avec un taux de croissance moyen supérieur de plus d'un demi point sur l'ensemble du siècle prochain. Les hypothèses implicites quant à la taille des réserves d'énergies fossiles et au coût de leur exploitation demandent à être sérieusement examinées.
- Dans cet ensemble, IS92f peut-être apparaît comme la vision la plus cohérente. Un faible taux de croissance retarde la transition démographique et limite les progrès sur intensité énergétique dans un monde qui reste fortement dépendant des énergies fossiles. Ce scénario, très proche d'IS98a2, peut être interprété comme un scénario doublement égoïste vis-à-vis du futur : les taux d'épargne sont faibles, et il n'y a pas d'orientation de l'investissement vers la décarbonisation. Par rapport à IS92a cependant, la variation du taux de croissance démographique entraînée par une baisse de seulement 0,25% de la croissance économique est pour le moins discutable, surtout lorsque l'on constate que dans le même temps la trajectoire de l'intensité énergétique reste inchangée.

	POP	PIB/ POP	EP/ PIB	CO2/ EP	CO2	POP	PIB/ POP	EP/ PIB	CO2/ EP	CO2
IS92a	0,69%	1,58%	-0,96%	-0,22%	1,09%	=	=	+	+	+
IS92b	0,69%	1,58%	-0,98%	-0,25%	1,04%	=	=	+	+	+
IS92c	0,17%	0,89%	-0,66%	-0,65%	-0,24%	--	--	++	=	--
IS92d	0,17%	1,82%	-0,83%	-0,71%	0,46%	--	=	++	-	=
IS92e	0,69%	2,27%	-1,16%	-0,19%	1,61%	=	++	=	+	++
IS92f	1,09%	1,35%	-0,99%	-0,12%	1,33%	++	-	+	+	+
A1	0,72%	1,72%	-1,17%	-0,40%	0,88%	=	=	=	=	+
A2	0,72%	1,72%	-1,15%	-0,07%	1,23%	=	=	=	+	+
A3	0,72%	1,72%	-1,29%	-1,00%	0,16%	=	=	=	-	-
B	0,72%	1,34%	-1,04%	-0,23%	0,79%	=	-	+	+	=
C1	0,72%	1,42%	-1,62%	-1,48%	-0,96%	=	-	--	--	--
C2	0,72%	1,42%	-1,71%	-1,39%	-0,96%	=	-	--	--	--
IS98a1	0,27%	2,67%	-1,30%	-0,92%	0,71%	--	++	-	-	=
IS98a2	0,96%	1,27%	-0,73%	-0,13%	1,37%	++	-	++	+	+
IS98b1	0,28%	2,24%	-1,74%	-0,85%	-0,06%	--	++	--	-	-
IS98b2	0,62%	1,58%	-0,97%	-0,52%	0,71%	=	=	+	=	=
SGM97*	1,07%	1,89%	-1,75%	0,11%	1,32%	++	+	--	++	+

Tableau 7.3 : Tableau récapitulatif des taux de croissance moyens de la population, du PIB par tête, de l'intensité énergétique, du contenu carbone de l'énergie et des émissions de CO₂ entre 1990 et 2100 (*2050 pour SGM97). Dans la partie droite du tableau, les chiffres de gauches sont positionnés par rapport à la moyenne sur l'ensemble des scénarios : = signifie que l'écart à la moyenne n'excède pas 10% de l'écart entre le chiffre le plus élevé et le chiffre le moins élevé de la colonne de gauche correspondante, + et - signifient que l'écart à la moyenne est compris entre 10% et 30% (respectivement -30% et -10%) de la fourchette totale, ++ et -- que l'écart est supérieur à 30% (respectivement inférieur à -30%) de la fourchette totale.

b) Scénarios IIASA&WEC

Les scénarios IIASA&WEC appellent deux remarques principales. En premier lieu, les trois scénarios A1,2 et 3 présentent des niveaux d'émissions particulièrement différents (entre 6,8 et 22,1 GtC par an en 2100) avec des taux de croissance économiques et démographiques identiques. Le facteur discriminant est ici la nature du système énergétique mis en place (tout charbon pour A2, pétrole et gaz naturel pour A1, nucléaire et biomasse pour A3), qui se traduit dans le tableau 7.3 par l'intensité carbone de l'énergie primaire (de 0,22 tC/tep dans A3 à 0,61 tC/tep dans A2). L'intensité énergétique est une seconde variable explicative, mais elle ne joue pas du tout pour le passage de A2 à A1, et reste un élément mineur pour expliquer la diminution des émissions entre A2 et A3.

Ces trois scénarios traduisent ainsi numériquement la possibilité d'équilibres multiples fondés sur des systèmes techniques différents mais indiscernables du seul point de vue de la seule croissance économique. Ce point est particulièrement important, même s'il manque une évaluation des coûts d'abattement dans les trois cas, permettant de révéler la date à partir de laquelle la bifurcation vers l'un ou l'autre de ces équilibres est irréversible. En outre, l'optimisme technologique qui rend possible des transitions importantes sans modifier de manière importante les comportements (intensités énergétiques) demande à être examiné.

Les scénarios C1 et C2 correspondent à des politiques volontaristes menées dès aujourd'hui dans l'optique de réduire les consommations d'énergie et les émissions de CO₂. Les deux systèmes techniques possibles, le nucléaire et un panier mixte avec la biomasse et le solaire, sont impossibles à distinguer d'un point de vue agrégé. La nature des arbitrages entre ces deux utopies demande cependant à être précisée. Par rapport aux scénarios de la famille A, tout se passe comme s'il y avait une sorte de seuil au-delà duquel les efforts de réduction des émissions, et en particulier les efforts sur l'intensité énergétique qui est fortement sollicitée ici, devenaient coûteux. Nous observons en effet des taux de croissance annuels moyens 0,3% plus faibles dans C1 et C2 que dans A1, A2 ou A3, ce qui

induit un PIB mondial par tête inférieur de 25% en 2100. L'écart provient en particulier d'une politique de réduction des émissions commencée de manière très précoce : c'est principalement ce « timing » avancé de l'action qui distingue C1 et C2, et qui fonctionne comme une alerte contre des choix trop rapides. La nature des hypothèses permettant d'obtenir à la fois indifférence entre A1, A2 et A3 et différence forte entre les scénarios A et C demande à être examinée en détail¹⁸.

c) Scénarios IS98

Conformément à leur cahier des charges, les nouveaux scénarios du GIEC présentent à la fois plus de diversité que les scénarios de l'IIASA et du WEC et plus de cohérence interne que les IS92. Cette cohérence est fondée, nous l'avons vu, sur deux hypothèses fortes : une corrélation négative entre la richesse et l'accroissement démographique et une corrélation positive entre taux de croissance et diminution de l'intensité énergétique. Le taux de croissance apparaît ainsi comme une variable déterminante dans ces scénarios, et il faut s'interroger sur l'origine des écarts entre les trajectoires de croissance économique supposées des différents IS98.

La fourchette des taux de croissance entre 1990 et 2100 est en effet très importante : 1,27% pour IS98a2, 1,58% pour IS98b2 contre 2,24% pour IS98b1 et 2,67% pour IS98a1. Du point de vue régional, la distinction entre ces deux groupes de scénarios est tout aussi nette : IS98a1 et b1 présentent les rapports des PIB par tête entre l'annexe I et le reste du monde les plus faibles de l'ensemble des scénarios étudiés, alors qu'IS98b2 (1 à 3) et surtout IS98a2 (1 à 6,8) comptent parmi les plus élevés.

Le tableau 7.4 ci-dessous présente les PIB par tête en 2100 dans l'annexe I et hors de l'annexe I pour les quatre scénarios IS98. Nous constatons que quelle que soit l'importance de l'environnement et du développement dans les politiques internationales, tous les pays, qu'ils appartiennent ou non à l'annexe I, ont intérêt à se trouver dans un scénario A1 ou B1 plutôt que A2 ou B2. La supériorité des scénarios (1) sur les scénarios (2) est renforcée par le fait que d'un point de vue écologique, le scénario (1) correspondant au scénario (2) génère toujours moins d'émissions. IS98a1 atteint ainsi une concentration atmosphérique de moins de 700 ppm en 2100, contre plus de 750 pour a2. De même, IS98b2 conduit à moins de 550 ppm, ce qui est meilleur que les 650 de IS98b2.

Or à la différence des IS92 ou des scénarios de l'IIASA et du WEC, les nouveaux scénarios du GIEC ne sont pas distingués par des variables exogènes, mais par des variables de politique publique. Les décideurs peuvent donc choisir le futur qu'ils souhaitent voir se réaliser, et le tableau 7.4 sera ainsi facilement interprété comme un plaidoyer massif pour l'ouverture des frontières. Notons qu'une telle supériorité n'est pas clairement affichée dans les synopsis décrivant les différents scénarios : elle découle directement des hypothèses de fond des modèles économiques utilisés pour les numériser. La capacité de l'ouverture des économies à générer des gains productivité du capital aussi importants demande pour le moins à être discutée très sérieusement.

IS98a1 et IS98b1 peuvent être compris l'arbitrage entre deux formes d'altruisme envers les générations futures : la transmission de la richesse *via* des taux d'épargne élevés dans a1 contre la transmission de l'environnement dans a2. Choisir a1 au lieu de b1 conduit à diminuer les émissions cumulées sur le XXI^e siècle de 40%, mais avec une perte de 40% de la richesse moyenne par tête. Le « coût » implicite de l'abattement apparaît ainsi particulièrement élevé. Une comparaison avec les scénarios IIASA&WEC est ici éclairante : le passage de A1 à C1 se traduit en effet par une diminution de 53% des émissions pour une perte de PIB par tête à 2100 de 29%. Or dans ce cas de figure, C1 présente des trajectoires d'intensité énergétique et d'intensité carbone toutes deux plus faibles que celles de A1. Dans les scénarios du GIEC au contraire, l'intensité carbone d'IS98a1 commence par

¹⁸ Notons en dernier lieu que selon Nakićenović *et al.* (1998), les scénarios C se traduisent non seulement par un plus grand intérêt pour l'environnement, mais aussi pour les pays en voie de développement. Si les pays en voie de développement rattrapent bien plus vite les pays développés dans C que dans A, leur richesse en valeur absolue est plus élevée dans le dernier groupe de scénario que dans le premier.

être plus élevée que celle de IS98b1, mais diminue ensuite de manière vertigineuse entre 2020 pour rattraper cette dernière dès 2050. La différence est de ce point de vue moindre entre C1 et A1 qu'entre IS98a1 et IS98b1.

			Ouverture économique	
			Elevée (1)	Faible (2)
Importance des questions d'environnement et de développement	Faible (A)	Annexe I	107 180\$	46 231\$
		Non Annexe I	66 536\$	6 841\$
	Elevée (B)	Annexe I	66 517\$	54 399\$
		Non Annexe I	41 951\$	17 997\$

Tableau 7.4 : PIB par tête régionaux (en dollars 1990 par tête) en 2100 dans les quatre scénarios IS98.

Affinons notre analyse en décomposant les taux de croissance en trois périodes : 1990-2020, 2020-2050 et 2050-2100. Le tableau 7.5 montre ainsi que la différence entre IS98a1 et IS98b1 en termes de croissance économique se fait principalement sur la période 1990-2050. Au-delà de cette date en effet, les taux de croissance sont identiques. Or entre 1990 et 2020, le scénario IS98a1 fait moins bien qu'IS98b1 à la fois en termes d'intensité énergétique et d'intensité carbone. Le différentiel de croissance résultant est alors de 0,7 points. Par contre, entre 2020 et 2050, le scénario IS98a1 fait mieux que IS98b1 à la fois en termes d'efficacité énergétique et d'intensité carbone tout en ayant un taux de croissance moyen supérieur de 1% à celui d'IS98b1 !

L'optimisme technologique permettant de fonder cette transition énergétique très rapide et à coût négatif entre 2020 et 2050 demande pour le moins à être discuté. Le jeu d'hypothèses sous-jacent en matière de progrès technique et d'inertie du système énergétique qui permet un tel résultat demande à être explicité. En l'état actuel des choses, le scénario IS98a1 nous apparaît irréaliste.

		Taux de croissance annuel moyen		
		1990-2020	2020-2050	2050-2100
IS98a1	PIB/POP	2,14%	3,39%	2,56%
	EP/PIB	-1,21%	-1,82%	-1,05%
	CO ₂ /EP	0,24%	-1,14%	-1,49%
IS98b1	PIB/POP	1,49%	2,40%	2,60%
	EP/PIB	-1,73%	-1,62%	-1,81%
	CO ₂ /EP	-0,35%	-0,64%	-1,28%

Tableau 7.5 : taux de croissance annuels moyen par périodes du PIB par tête, de l'intensité énergétique et de l'intensité carbone de l'énergie primaire dans les scénarios IS98a1 et b1.

Terminons sur les émissions de CO₂. Nous avons déjà remarqué en outre que les scénarios IS98 font apparaître la possibilité inédite d'une diminution des émissions de gaz à effet de serre d'ici 2100 sans politique climatique particulière. Ces traits pourraient être interprétés comme poussant à la non intervention : la meilleure chose à faire pour abattre étant finalement d'ouvrir massivement les frontières et d'engranger les fruits de la diffusion massive du progrès technique. Néanmoins, la stabilisation des émissions est suffisamment tardive pour entraîner les concentrations au-delà de 700 ppm, ce qui est élevé. Le message peut alors être retourné en soulignant que même sous des hypothèses très optimistes pour la croissance et pour la diffusion technologique, il n'est pas possible de stabiliser naturellement les émissions en dessous de 750 ppm à l'horizon 2100.

d) Quelques mots sur SGM97

Dans cet ensemble, le scénario SGM97 apparaît comme atypique. S'il est caractérisé par une très forte croissance économique (1,9% par an jusqu'en 2050) et par une très forte diminution de l'intensité

énergétique (la plus faible en 2050), ce qui le place dans une logique comparable à celle de IS98a1, il est le seul scénario à dissocier aussi nettement l'intensité énergétique de l'intensité carbone. SGM fait en effet l'hypothèse d'une baisse très forte de l'intensité énergétique alors que le contenu carbone de l'énergie primaire reste stationnaire. Nous nous trouvons typiquement dans un scénario de « dématérialisation » de l'économie mondiale dont la valeur ajoutée serait fondée sur la production de biens et de services au contenu énergétique de plus en plus faible.

La déclinaison d'une telle hypothèse sur l'ensemble des pays de la planète pose cependant quelques problèmes. En premier lieu, au sein de l'annexe I, la Chine est supposée connaître un taux de croissance du PIB par tête de 5% par an jusqu'en 2050 alors que les autres pays en voie de développement ne sont qu'à 2% pour l'Inde et 1,3% pour le reste du monde. Même si la plupart des scénarios font l'hypothèse que la croissance des pays du Sud sera tirée par la Chine, aucun ne propose des écarts aussi importants entre ce pays et les autres.

Mais le plus étonnant est de constater que l'intensité énergétique de la Chine est supposée être en 2050 trois fois et demie plus faible que celle des USA (0,07 contre 0,23 tep/1000\$) : tout se passe comme si ce pays expérimentait un « effet tunnel » (Berrah, 1994) particulièrement important lui permettant de sortir du sous-développement en fondant sa croissance sur des activités très peu consommatrices d'énergie. Si les statistiques chinoises montrent aujourd'hui des progrès importants dans ce domaine, la prolongation de ces tendances sur un horizon aussi long suppose que ce pays effectue des choix économiques et techniques très particuliers qu'il est pour le moins nécessaire d'explicitier.

Conclusion

La question de l'élargissement de l'annexe B aux pays en voie de développement apparaît ainsi mal engagée. Les positions initiales des différents pays dans la négociation sont particulièrement divergentes. Or la coordination par les quantités initiée à Kyoto complique la discussion dans la mesure où elle fait porter doublement l'incertitude sur les efforts que chaque Partie devra finalement consentir. Non seulement le fait de donner des limites quantitatives reporte mécaniquement l'incertitude sur les coûts d'abattement. De plus, les efforts quantitatifs réels que les différentes parties subiront dans le futur sont eux-mêmes dépendants des incertitudes sur les trajectoires de référence. Or nous avons vu dans la seconde section que les incertitudes sur la trajectoire de croissance à long terme sont particulièrement importantes.

A ce niveau de la discussion, nous pouvons donc craindre les risques de « régression infinie des controverses » soulignée par Philippe Roqueplo. Comme le dit Jean-Charles Hourcade, « *this overview shows the regressum ad infinitum of scientific controversies induced by a focus of the negotiation on quota allocation. This does not mean that equity must not be considered in the negotiation process; it means that it will be impossible to agree on a numerical criterion of equity. The conclusion is that negotiations aiming at the allocation of initial quota would place each country in a position where it would necessarily adopt non-cooperative argumentation. Because of the amount of controversies and value judgements involved, it would be difficult to put some rational in the equity debate; this would exacerbate the division lines instead of easing a progressive convergence. An international tradable permit system does not overcome this preliminary difficulty, and negotiation would prove self-defeating* » (1994, p.394).

Il nous faut néanmoins rester prudent. Le chapitre 3 nous a en effet montré qu'une incertitude importante sur le moyen – long terme pouvait finalement n'avoir qu'un impact limité sur la décision de court terme. Il nous faut donc procéder à un examen numérique de la manière dont se comportent les différentes règles d'élargissement de l'annexe B proposées dans la littérature sous incertitude sur le scénario de référence. Cette exploration numérique fait l'objet du chapitre suivant.

Chapitre 8 Négociabilité des règles d'allocation internationale des quotas d'émissions

Nous avons vu au chapitre 7 que la négociation sur l'élargissement de l'annexe B aux pays en voie de développement se déroule dans un contexte particulièrement difficile. Les positions des différentes Parties dans la négociation sont particulièrement éloignées. En outre, l'incertitude tant sur l'ampleur et la distribution des dommages du changement climatique que sur les coûts d'abattement compliquent encore la discussion. Nous avons aussi montré que la nature même du régime de coordination par les quantités adopté à Kyoto renforce ces incertitudes (i) en faisant payer la garantie sur la quantité d'émissions par un risque important sur les coûts d'abattement, et (ii) en plaçant la trajectoire d'émissions de référence au cœur du débat, puisqu'elle conditionne la contrainte réelle qui pèsera sur les émissions de chaque partie, et donc *in fine* sur le montant de sa facture climatique.

Nous nous proposons dans ce chapitre de pousser à son terme cette logique de coordination par les quantités en examinant dans quelle mesure elle constitue un cadre viable pour négocier l'élargissement de l'annexe B. Nous nous proposons donc de simuler la distribution des coûts d'abattement qui résulterait de l'adoption des principales règles d'élargissement de l'annexe B, puis de tester la stabilité de cette distribution en fonction du scénario de référence à long terme. Plus les distributions se révéleront sensibles aux incertitudes pesant sur le scénario économique de long terme, plus sont *a priori* importants les risques d'une configuration de blocage dans laquelle chaque règle serait refusée par l'une ou l'autre des parties qui invoquerait pour ce faire le scénario le moins avantageux pour elle. La plus ou moins grande sensibilité de la distribution des coûts d'abattement aux hypothèses sur la croissance à long terme constituera ainsi un premier indicateur de la négociabilité des règles d'élargissement de l'annexe B considérées.

En second lieu, les différentes parties en présence exigent que le résultat de la négociation soit « équitable ». Ce mot recouvre, nous l'avons vu, des acceptions très différentes selon la nationalité de celui qui l'emploie. En l'absence d'une règle éthique qui s'imposerait de manière indubitable, nous utilisons ici comme point de repère la distribution des efforts d'abattement que nous avons obtenue au chapitre 4. Cette distribution présente en effet un double intérêt. Elle est d'une part cohérente avec l'idée selon laquelle les politiques climatiques pourront difficilement être le lieu d'une importante redistribution des richesses entre le Nord et le Sud. Elle débouche d'autre part sur une répartition des coûts, au prorata de la richesse par tête, qui apparaît comme une traduction possible du principe de responsabilité « commune mais différenciée » inscrit dans la Convention Cadre sur le Changement Climatique. L'écart entre la distribution des coûts d'abattement que nous obtiendrons numériquement et cette référence nous fournira un second indicateur sur la négociabilité des règles d'élargissement de l'annexe B.

L'évaluation des conséquences économiques des différentes règles d'allocation des quotas d'émission de gaz à effet de serre a déjà donné lieu à de nombreuses analyses depuis la signature de la Convention Cadre sur le Changement Climatique en 1992. Les débats sur l'élargissement de l'annexe I aux pays en voie de développement ont suscité une recrudescence d'articles sur le sujet. Rose *et al.* (1998) utilisent un modèle très simple d'équilibre du marché des permis pour tester une très vaste gamme de règles d'allocation initiale des permis d'émissions négociables (PEN). Leur conclusion principale est que la convergence par tête débouche sur des distributions de coûts nettement supérieures aux autres. À l'aide du modèle GREEN de l'OCDE, Jean-Marc Burniaux (1999) compare les règles d'allocation par tête et d'allocation sur la base des émissions 1990, et conclue lui aussi que cette dernière solution

est la plus intéressante d'un point de vue économique¹. Berk *et al.* (1999) entreprennent un travail similaire avec le modèle FAIR, développé sur la base d'IMAGE. Leur étude suggère au contraire qu'une approche par tête serait plus efficace, mais ce résultat est obtenu dans le cadre particulier d'un objectif de stabilisation des concentrations à 450 ppm.

A notre connaissance, toutes ces analyses restent fondées sur une seule évaluation des coûts d'abattement et sur une seule trajectoire de croissance de référence. Nous nous proposons ici au contraire de procéder à un examen de la sensibilité de la distribution de ces coûts à la trajectoire de référence. Pour ce faire, nous rappellerons dans la première section les principales règles d'élargissement proposées dans la littérature. Nous présenterons ensuite en section 2 un modèle de simulation permettant d'examiner la distribution des coûts d'abattement régionaux consécutifs à l'adoption d'une règle d'élargissement donnée, et ce avec ou sans mise en place d'un marché de PEN. Nous discuterons enfin dans la section 3 de la nature des distributions obtenues et de leur sensibilité aux trajectoires économiques de référence.

Cette démarche doit cependant être précédée d'une précision d'ordre méthodologique. La légitimité de l'économiste à prendre position sur la question brûlante de l'équité des distributions des coûts d'abattement est en effet fortement controversée. En témoignent les débats très vifs suscités en 1999 par la préparation d'un document méthodologique sur l'équité, préalable à la rédaction du troisième rapport du GIEC. Rappelons néanmoins que dans le cas de la limitation des émissions de GES, et même si un marché international de PEN est mis en place, la séparabilité entre équité et efficacité ne serait pas automatiquement assurée. Chichilnisky *et al.* (1999) démontrent en effet que dans le cadre d'un bien public produit de manière décentralisée comme le bien public climat, ces deux dimensions ne peuvent être séparées. En outre, le petit nombre d'Etats présents sur le marché et la perspective de voir la Russie contrôler la majeure partie de l'offre de permis constituent une seconde série d'arguments qui jettent un doute sérieux sur le fait que les conditions du second théorème de l'économie du bien-être puissent en pratique être remplies.

Au-delà de cet argument théorique, et conformément à la position que nous avons adoptée dès l'introduction, les conséquences économiques de la distribution initiale des permis d'émissions négociables sont suffisamment importantes pour que la décision ne puisse reposer uniquement sur un principe éthique *a priori* (Godard, 1999). Si l'économiste n'a que peu de choses à dire sur ce qui est juste, et ce d'autant moins que la traduction concrète de ce concept dépend des contextes culturels, politiques, économiques et sociaux considérés ainsi que, dans le cas d'espèce, de la perception des responsabilités passées pour les émissions de gaz à effet de serre, il ne peut par contre éviter d'examiner les conséquences des différentes règles d'allocation des contraintes d'émissions. Par exemple, les économistes doivent pouvoir fournir une réponse à la proposition d'égalisation des émissions par tête d'Agarwal qui aille au-delà de la simple constatation de son caractère irréaliste².

1. Multiplicité des règles d'allocation des quotas d'émissions

Commençons par préciser le vocabulaire. Du fait de l'ambiguïté du Protocole de Kyoto sur les mécanismes de flexibilité, la discussion a d'abord porté sur une répartition internationale d'objectifs nationaux d'émissions à l'horizon 2010, ceux-ci étant ensuite devenus des allocations initiales de droits à émettre du CO₂ dès lors que la possibilité d'un marché de permis d'émissions négociables s'est fait jour. Or il existe une différence de fond entre ces deux notions, puisque sans marché

¹ Ces conclusions demandent cependant à être examinées de manière très précise dans la mesure où elles dépendent fortement du fait que dans le modèle utilisé par l'auteur, le marché n'est pas parfait, et les coûts de transaction semblent d'autant plus élevés que les échanges sont importants, ce qui entraîne une préférence pour la règle qui se traduit par le moins d'échanges.

² L'évaluation de la robustesse des règles d'allocation des quotas d'émissions a déjà fait l'objet de deux communications en 1999 avec Thierry Le Pesant et Jean-Charles Hourcade, à un colloque joint de l'IIASA, de l'EMF et de l'AIE, et aux journées du PIREE de Strasbourg (Lecocq *et al.*, 1999).

international ces niveaux indiquent les émissions qui seront effectivement réalisées dans les pays considérés, alors qu'avec un marché, la distribution finale des émissions est *a priori* inconnue.

En second lieu, rappelons que toute règle d'élargissement de l'annexe B aux pays en voie de développement doit comprendre deux volets distincts :

- une règle d'élargissement *stricto sensu* fixant les conditions d'entrée des pays en voie de développement dans l'annexe B et,
- une règle fixant l'attribution des quotas d'émissions pour les pays développés comme pour les pays en voie de développement.

Les règles d'attribution des quotas d'émissions (encore appelées « règles de convergence » dans la littérature, bien qu'il n'y ait pas forcément convergence de quoi que ce soit) sont souvent mises en avant. Elles masquent l'importance des conditions d'entrée des pays en voie de développement dans l'annexe B. Les règles d'élargissement se révèlent en effet déterminantes tant pour le niveau mondial d'émissions finalement obtenu, que pour la dynamique d'un marché de permis d'émissions négociables : nous avons vu en effet que l'entrée des pays en voie de développement sur le marché est susceptible d'apporter une quantité importante d'opportunités de réductions des émissions à faible coût.

Dans la suite de ce chapitre, nous nous consacrerons bien entendu aux deux volets des règles d'élargissement (conditions d'entrée des PVD et règles de distribution des quotas). Nous utiliserons le terme générique de « règle d'allocation des quotas d'émissions » pour désigner l'ensemble de ces deux mécanismes. Pour compléter ces notations, notons que, sauf mention expresse du contraire, nous utilisons dans la suite le terme d'annexe B pour désigner l'actuel ensemble de pays regroupés sous ce nom, et non ses possibles extensions futures.

1.1. Des critères généraux d'allocation des quotas d'émissions

Il existe en théorie de très nombreuses manières possibles de construire des règles d'allocation des quotas d'émissions de GES. Rose *et al.* (1998) proposent ainsi une typologie des règles en fonction des paramètres qui guident la répartition des quotas :

- La première catégorie recouvre toutes les règles qui définissent directement la répartition des quotas d'émissions en fonction de paramètres observables comme par exemple les émissions passées (règle du « *grandfathering* ») ou la population (règle d'allocation des quotas par tête, Agarwal et Narain, 1991).
- Rose *et al.* rangent dans une seconde catégorie toutes les règles qui consistent d'abord à répartir les coûts de réduction des émissions entre pays (comme la règle définie au chapitre 4). Dans une coordination par les quantités, cette procédure est cependant pour le moins paradoxale. Il faudrait en effet calculer les quotas d'émissions qui permettraient d'atteindre la distribution des coûts souhaitée, calcul qui est par hypothèse impossible du fait des incertitudes sur les coûts d'abattement comme sur les trajectoires d'émissions de référence.
- La troisième catégorie recouvre enfin des procédures de négociation. Est alors considérée comme « juste » toute distribution des quotas qui procède d'un processus de négociation qui sera lui-même considéré comme juste. Nous ne prendrons pas ici en compte ce type de « règles d'allocation des quotas d'émissions », même si la négociation climat peut d'une certaine manière être rattachée à cette dernière catégorie.

Nous ne nous intéresserons donc ici qu'à la première de ces trois catégories, à savoir les règles définissant à la fois les modalités d'entrée des PVD dans l'annexe B et l'allocation des quotas

d'émissions au sein de l'annexe B en fonction de paramètres économiques observables. Nous restreignons encore le champ de notre étude en ne considérant ici que les règles qui se fondent sur des paramètres « indubitables » tels que les PIB régionaux, les populations, les niveaux d'émissions ou les niveaux de consommation énergétique. Des constructions plus complexes fondées sur des indicateurs plus fins, par exemple sectorialisés, pourraient être envisagées sur le papier, mais les différences entre les systèmes statistiques nationaux, la nécessité de pouvoir contrôler facilement les indicateurs retenus et le risque d'introduire un nouvel élément de controverses dans une négociation qui en compte déjà beaucoup nous pousse à les rejeter d'emblée³.

1.2. Principales règles d'allocation des quotas proposées dans la littérature

1.2.1. Convergence des émissions par tête

Dans un papier de 1991, Agarwal et Narain ont proposé de manière très provocatrice que les quotas d'émissions soient affectés dès aujourd'hui en attribuant à tout individu le même droit à émettre des gaz à effet de serre (nous nous limiterons ici au CO₂). Cette proposition a largement contribué à mettre en avant la question de l'équité, fondamentale pour les pays en voie de développement (Shukla, 1996). Allouer dès aujourd'hui les quotas suivant ce principe est cependant inacceptable pour les pays développés. Le tableau 8.1 montre en effet que les différences d'émissions par tête entre pays sont aujourd'hui particulièrement importantes. Pour conserver l'idée d'une répartition au prorata de la population, l'égalisation des quotas d'émissions par tête a été posée comme un objectif à atteindre à terme et non plus à réaliser immédiatement.

Émissions de CO ₂ d'origine fossile par tête					
Afrique du Sud	2,78	Danemark	3,17	Italie	2,05
Allemagne de l'est	4,85	Emirats arabes unis	8,98	Japon	2,59
Allemagne de l'ouest	3,30	Espagne	1,65	Nouvelle Zélande	2,30
Arabie Saoudite	3,35	Etats Unis	5,88	Norvège	2,43
Australie	4,48	Ex-URSS	3,60	Pays-Bas	3,39
Autriche	2,57	Finlande	3,85	Pologne	2,57
Belgique	3,23	France	1,77	Portugal	1,32
Brésil	0,66	Grèce	1,97	Royaume-Uni	2,92
Canada	5,01	Hongrie	1,97	Suède	2,42
Chine	0,62	Inde	0,27	Tchécoslovaquie	3,95

Tableau 8.1 : Niveaux d'émissions de carbone d'origine fossile par tête en 1995 et tonnes de carbone par habitant et par ans (Source : Enerdata).

Ce principe de convergence des quotas par tête peut ensuite être décliné de plusieurs manières différentes selon la date à laquelle tous les quotas doivent avoir convergé, le niveau d'émissions par tête commun à cette date, la manière dont les pays en voie de développement intègrent l'annexe B et la manière dont leur sont attribués les quotas à partir de cet instant, compte tenu du fait que certains d'entre eux devraient rester à des niveaux d'émissions par tête inférieurs à la cible finale pendant de nombreuses décennies. Manne et Richels (1997) proposent par exemple un système dans lequel tous les pays en voie de développement intègrent l'annexe B à une même date, leurs émissions par tête convergeant ensuite linéairement vers l'objectif à partir du niveau atteint à la date d'intégration. Onigkeit et Alcamo (1999) présentent un système un peu différent dans lequel les pays en voie de développement intègrent l'annexe B lorsque leur revenu par tête dépasse une valeur donnée à l'avance, date à partir de laquelle ils maintiennent constantes leurs émissions par tête jusqu'à ce qu'elles soient rejointes par la moyenne des émissions de l'annexe B.

³ Nous rejetons ainsi pour la même raison pratique les procédures de répartition basées sur des analyses multicritères (Ridgley, 1996), inapplicables dans un cadre aussi conflictuel et incertain que celui de la négociation climat.

La convergence par tête suscite un intérêt particulier dans la mesure où elle semble découler d'un des principes les plus fondamentaux de nos sociétés démocratiques, celui de l'égalité entre tous les citoyens (Kverndokk, 1995). Olivier Godard (1999) montre cependant qu'il s'agit là d'une illusion d'optique fondée sur le fait que le caractère moralement positif de notions telles que l'égalité devant la loi est étendu sans examen à l'égalité des droits à émettre du CO₂. Or il est difficile de justifier qu'émettre du CO₂ fasse partie des droits constitutifs de la personne humaine, mis à part peut-être pour les émissions provenant de la satisfaction des besoins fondamentaux de l'être humain. Les émissions de CO₂ apparaissent plutôt comme la résultante de conditions économiques, géographiques, sociologiques et politiques différentes d'un pays à l'autre, et dont la convergence absolue n'est ni possible ni même souhaitée (Dessus *et al.*, 1999). Olivier Godard souligne à ce propos le paradoxe suivant : si un marché de permis d'émissions négociables est mis en place, alors il est plus facile de mettre en œuvre une dotation au prorata de la population, mais celle-ci perd de sa consistance dans la mesure où *in fine* les émissions par tête resteront après échanges très différentes entre les pays.

1.2.2. Principe du fait acquis (« *grandfathering* »)

Une seconde solution couramment proposée (par les pays de l'annexe B en particulier) consiste à demander à tous les pays de réduire leurs émissions d'un même pourcentage par rapport à une année de référence donnée. Cette solution revient donc à prendre pour acquise la distribution actuelle des émissions entre les pays. D'une manière symétrique au rejet de la convergence par tête par les pays du Nord, le « *grandfathering* » est considéré comme inacceptable par les pays du Sud. Cette règle d'allocation revient en effet à pérenniser les différences de structure dans les émissions entre pays développés et pays en voie de développement tout comme au sein de chacun de ces deux groupes de pays.

1.2.3. Egalisation de la contribution individuelle au forçage radiatif

Au cours de la troisième Conférence des Parties de Kyoto (1997), la délégation brésilienne a proposé un mécanisme original d'attribution des quotas d'émissions entre les différents pays. Le point clé de ce système est de caractériser la responsabilité de chaque pays en fonction de la contribution de leurs émissions passées et présentes au changement climatique. Trois indicateurs sont ici retenus : l'augmentation de la température, la vitesse de cette augmentation ainsi que le niveau d'élévation du niveau des mers. La méthodologie utilisée pour examiner les responsabilités de chaque pays se fonde sur un modèle représentant successivement les passages des émissions à la concentration atmosphérique en CO₂, de la concentration au forçage radiatif, puis du forçage radiatif à l'élévation de la température et à l'élévation du niveau des mers.

Bien que la proposition brésilienne n'ait pas été adoptée à Kyoto, la Troisième Conférence des Parties a mandaté l'un de ses organes techniques, le SBSTA (« *Subsidiary Body on Scientific and Technical Advise* »), pour en examiner les fondements scientifiques et méthodologiques. A ce jour et à notre connaissance, aucune évaluation chiffrée des quotas à distribuer sur la base de cette proposition n'a encore été réalisée du fait des nombreuses incertitudes qui pèsent sur le calcul.

1.2.4. Règle de Jacoby

Dans un papier de 1998, Henri Jacoby *et al.* proposent une règle d'entrée des pays en voie de développement fondée sur l'idée selon laquelle plus les pays sont riches, plus ils contribuent à l'effort climatique. La règle consiste donc en premier lieu à définir un seuil de PIB par tête w^* en deçà duquel les pays en voie de développement restent en dehors de l'annexe B. Dès ce seuil franchi, les pays rentrent dans l'annexe B. Ils se voient alors imposer un taux de croissance maximal pour leurs émissions de CO₂. Ce "taux plafond" diminue ensuite au fur et à mesure que le pays devient plus riche, jusqu'à devenir finalement négatif, ce qui revient à imposer une diminution des émissions.

Mathématiquement, cette règle, que nous intitulerons par la suite, règle de Jacoby, se traduit de la manière suivante :

$$\text{Pas de contrainte} \quad \text{si } w_{t-1} < w^* \quad (\text{le pays est alors hors de l'annexe B}) \quad (8.1)$$

$$\frac{dE_t}{E_t} = \gamma - \alpha (w_{t-1} - w^*)^\beta \quad \text{si } w_{t-1} \geq w^* \quad (\text{le pays rentre dans le marché}) \quad (8.2)$$

Nous avons noté ici E_t les émissions de CO₂ du pays considéré, w_{t-1} le PIB par tête à la période précédente (qui sert de référence pour calculer les efforts de la période qui commence), w^* le seuil (mesuré en \$ par tête) à partir duquel les pays rentrent dans le protocole, γ est le pourcentage de croissance des émissions autorisé pour les pays qui franchissent le seuil, et α et β des paramètres contrôlant la vitesse à laquelle les taux de croissance limite évoluent. La figure 8.1, tirée de Jacoby *et al.* (1998) présente graphiquement l'évolution du taux de croissance des émissions plafond en fonction de la richesse.

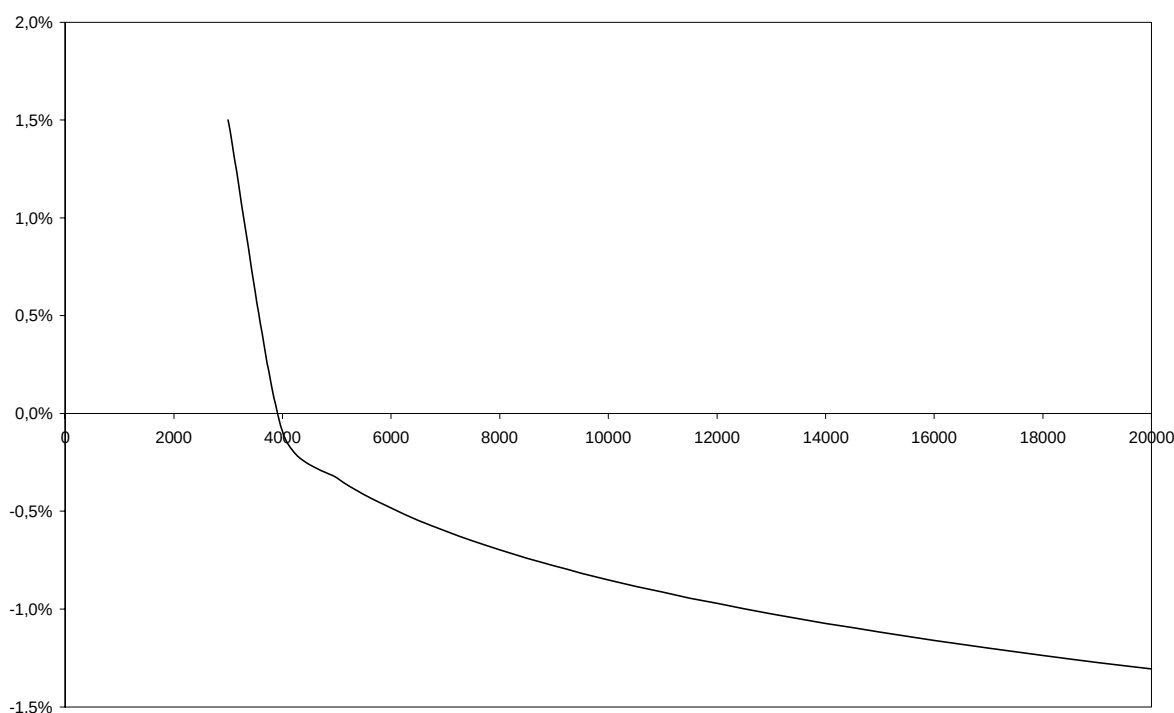


Figure 8.1 : Forme de l'évolution du taux de croissance des émissions dE/E en fonction du PIB/tête w dans la règle de Jacoby (paramètres : $w^*=3000$, $\alpha=0,004$, $\beta=0,2$, $\gamma=0,015$).

Par rapport aux règles précédemment étudiées, cette construction présente l'intérêt d'être complètement adaptative, en ce sens qu'elle conditionne les efforts à la richesse des différents pays. En contrepartie, le niveau de concentration atmosphérique finale en CO₂ n'est pas connu à l'avance. La discussion que nous avons menée au chapitre 3 (section 2.4) suggère que l'intensité dans chacun des pays joue un rôle important. Notons enfin que ce dispositif présente le défaut d'inciter les pays en voie de développement à maximiser leurs émissions avant d'entrer dans l'annexe B afin de bénéficier du point de départ le plus haut possible. Nous laisserons cependant cette question de côté dans cet exercice⁴.

1.2.5. Règles de Colombier

Dans une étude réalisée en 1998 pour la Mission Interministérielle à l'Effet de Serre, Michel Colombier propose deux règles de convergence de l'intensité carbone du PIB, c'est-à-dire de la

⁴ Cette question n'est en réalité pas propre à la règle de Jacoby mais à toute construction dans laquelle les émissions de CO₂ des pays en voie de développement à la date de leur entrée dans l'annexe B constituent un niveau de référence par rapport auquel leurs dotations suivantes sont calculées.

quantité d'émissions par unité de valeur ajoutée. Dans la première, la nature des efforts à réaliser dépend à la fois des émissions par tête (plus on émet, plus il faut décarboniser), et de la croissance du PIB (plus la croissance est élevée, plus on doit décarboniser). L'idée implicite est que la capacité d'un pays à infléchir sa trajectoire d'émissions est d'autant plus forte que sa croissance est élevée et que ses émissions par tête sont élevées. Dans la seconde, la diminution de l'intensité carbone dépend de l'intensité carbone elle-même, ainsi que du taux de croissance du PIB. Nous retrouvons alors une logique proche de celle développée par Jacoby, mais avec pour variable l'intensité carbone et non plus la quantité totale d'émissions.

2. STARTS R : un modèle de simulation d'un marché de permis d'émissions négociables

2.1. Présentation du modèle

Nous utilisons ici un modèle d'équilibre partiel du marché des permis d'émissions négociables de CO₂. Nous le complétons par un module permettant d'estimer très simplement les coûts macroéconomiques induits par les transferts financiers entre régions (achats ou ventes de PEN). Etant donnée une règle d'allocation initiale des permis d'émissions, le modèle trouve à chaque période de 10 ans le prix des permis qui équilibre le marché du carbone puis calcule *ex post* la variation du PIB de chaque région. Ce modèle, que nous nommons ici STARTS R⁵, est analogue à celui développé par Burniaux (1998) ou par Rose *et al.* (1998). Le lecteur trouvera en section 2.2.5 un tableau synthétique des équations et des paramètres du modèle, et en Annexe 5 le code informatique.

2.1.1. Equilibre sur le marché de permis d'émissions

Nous supposons le temps divisé en périodes de Δ années chacune et indicées par t ($t \in \{0, 1, \dots, T\}$). Nous considérons un monde comprenant N régions indicées par r ($r \in \{1, 2, \dots, N\}$). A chaque période, un sous-ensemble B_t ($B_t \subset \{1, 2, \dots, N\}$) des N régions se regroupe au sein de l'annexe B. Chacune des régions de ce groupe ($r \in B_t$) se voit imposer pour la période considérée une contrainte quantitative sur ses émissions de CO₂ sous la forme d'un montant d'émissions $Q_{t,r}$ à ne pas dépasser⁶. Afin d'atteindre cet objectif, chaque région de l'annexe B a deux possibilités :

- réduire ses émissions domestiques d'une fraction a_r par rapport à la trajectoire d'émissions de référence $\bar{E}_r$. Cet abattement lui coûte annuellement un montant $C_r(a_r)$ mesuré en dollars⁷, ou
- acheter des permis d'émissions à une autre région de l'annexe B. Les permis d'émissions $Q_{t,r}$ sont en effet considérés comme des biens librement échangeables⁸.

⁵ Cette dénomination est pour l'heure plus un programme de recherche pour le futur que la traduction par un sigle d'une réalité concrète. Comme le lecteur pourra le constater dans la suite, le modèle STARTS R n'a en effet aucun lien direct avec les modèles d'optimisation STARTS 1 et 2 développés aux chapitres 1 et 6. Nous espérons cependant coupler dans un avenir proche un modèle d'optimisation régional avec une représentation d'un marché international de PEN, justifiant ainsi *ex post* l'appellation de notre mécanique numérique.

⁶ Dans la formulation du Protocole de Kyoto, la contrainte se présente sous la forme d'une quantité totale d'émissions à ne pas dépasser sur les Δ années de la période (en l'occurrence 2008-2012 pour Kyoto). Nous nous donnerons ici un plafond d'émissions annuel $Q_{t,r}$ qui devra être réalisé durant toutes les années de la période t considérée. Cette restriction n'est pas particulièrement gênante dans la mesure où STARTS R travaille par pas de Δ années et non année par année.

⁷ Sauf indication contraire, toutes les grandeurs de STARTS R sont annuelles.

⁸ Nous ne supposons ici aucun mécanisme de prix plancher ou plafond, et aucun plafond sur les quantités qui peuvent être échangées.

Les régions qui sont hors de l'annexe B à la période t ($r \notin B_t$) sont supposées n'avoir aucune contrainte climatique particulière et suivre leur trajectoire d'émissions de référence ($\bar{E}_t$). Nous excluons en particulier que des pays de l'annexe B puissent réaliser *via* un « mécanisme de développement propre » (MDP) une partie de leurs obligations dans les pays hors de l'annexe B. Nous justifions cette restriction par le fait que tant les mécanismes du MDP que les potentiels d'abattement qu'il est susceptible d'apporter sont aujourd'hui fortement controversés. Cependant, si le MDP s'avérait à l'avenir susceptible de générer des transactions portant sur une quantité de carbone importante, son impact sur le fonctionnement du marché des PEN devrait être étudié avec soin.

Il nous faut maintenant examiner comment chaque région arbitre entre transactions sur le marché et abattements domestiques. Dans un souci de simplicité, nous supposons ici que ni les émissions de référence, ni les coûts d'abattement, ni les quotas d'émissions aux périodes ultérieures ne dépendent de la quantité d'abattement domestique réalisée à la date t . Nous n'introduisons ainsi ni progrès technique induit, ni inertie du capital qui pourraient inciter une région à abattre fortement aujourd'hui dans le but de réduire ses coûts d'abattement demain⁹. De même, nous ne considérerons pas de règles d'attribution des quotas d'émissions qui pourraient dépendre des abattements domestiques déjà réalisés¹⁰. Sous ces hypothèses, l'arbitrage entre abattement domestique et échange de permis sur le marché à la date t dépend uniquement des paramètres économiques ($\bar{E}_t$, C_t , Q_{ta_t}) à cette date.

Si nous supposons enfin que les différentes régions ont un comportement de « *price taker* » (nous reviendrons longuement sur cette hypothèse à la section suivante), chaque région cherche alors à minimiser ses dépenses d'abattement sous contrainte de non dépassement de son quota d'émissions, soit, si nous notons Q_t la quantité de permis achetée sur le marché et p_t le prix de ces permis sur le marché :

$$\text{Min}_{a_t, Q_t} C_t(a_t) + p_t \cdot Q_t \quad (8.3)$$

$$\text{s.c. } (1-a_t) \cdot \bar{E}_t \leq Q_t + Q_{ta_t} \quad (8.4)$$

Le niveau optimal de réduction des émissions a_t^* et la quantité de permis achetée sur le marché Q_t^* (quantité éventuellement négative) sont alors donnés par les deux équations suivantes :

$$\frac{dC_t}{da}(a_t^*) = p_t \text{ Le coût marginal d'abattement domestique égale le prix des permis} \quad (8.5)$$

$$(1-a_t^*) \cdot \bar{E}_t = Q_t^* + Q_{ta_t} \quad \text{La contrainte d'émissions est satisfaite} \quad (8.6)$$

A chaque période, le prix d'équilibre sur le marché des permis d'émissions négociables est donc donné par les deux équations suivantes :

$$\frac{dC_{1t}}{da}(a_t^*) = \frac{dC_{2t}}{da}(a_t^*) = \dots = \frac{dC_{Nt}}{da}(a_t^*) = p_t \quad \forall r \in B_t \quad (8.7)$$

⁹ Dans une version ultérieure du modèle actuellement en cours de développement au CIRED, nous introduisons le progrès technique induit et les inerties. L'arbitrage entre abattement domestique et échange sur le marché des PEN à la date t dépend alors des anticipations sur les coûts d'abattement futurs comme sur le prix futur des permis d'émissions négociables. L'univers des équilibres possibles devient nettement plus vaste : il convient de déterminer sous quelles conditions le marché reste stable, et quels sont les mécanismes (anticipations sur les prix, niveau d'inertie, plus ou moins forte induction du progrès technique) critiques pour cette stabilité. Cet axe de la recherche qui fait aujourd'hui l'objet d'une thèse de doctorat au CIRED dépasse de loin les ambitions du présent travail.

¹⁰ Jean-Charles Hourcade suggère par exemple qu'une pénalité pourrait être imposée aux pays qui resteraient trop longtemps éloignés d'un niveau d'émissions par tête de référence, par exemple le niveau d'émissions par tête moyen des pays de même richesse économique. Dans un tel cadre, chaque pays devrait arbitrer à chaque période entre réduire ses émissions domestiques aujourd'hui ou acheter des permis moins chers à l'extérieur mais subir les pénalités demain.

$$\sum_{r \in B_t} (1-a_r^*) \cdot \bar{E}_{rt} = \sum_{r \in B_t} Q_{ta_{rt}} \quad (8.8)$$

2.1.2. Comportements monopolistiques et « hot air » Russe

Etant donné le marasme dans lequel se trouve aujourd'hui l'économie russe, il est probable que son niveau d'émissions en 2010 sera, sans qu'elle mette en place de politique particulière, inférieur à son quota d'émissions prévu à Kyoto. A supposer qu'un marché de permis d'émissions négociables se constitue, il sera possible à la Russie de vendre les permis correspondants à la différence sans que cette transaction ne corresponde à une quelconque réduction de ces émissions domestiques. La différence (positive) entre le quota et le niveau d'émissions de référence est connue sous le nom « d'air chaud » (*hot air*). Ce problème aujourd'hui circonscrit à la seule Russie pourrait tout à fait concerner d'autres pays si les règles d'allocation des quotas d'émissions conduisent à fixer ces quotas au dessus du niveau d'émissions de référence. Se pose immédiatement le problème du comportement d'un marché de PEN en présence de *hot air*.

Attachons nous tout d'abord à une configuration simple dans laquelle il n'y a qu'un vendeur et un acheteur. Le vendeur dispose d'une quantité A de permis « fictifs ». Nous supposons dans un premier temps que l'acheteur n'est intéressé que par tout ou partie des permis « fictifs », par exemple parce que ses engagements l'obligent à réduire ses émissions d'une quantité inférieure ou égale à A. Dans cette configuration de marché, l'acheteur a intérêt à acheter tant que le prix des permis reste inférieur à son propre coût marginal de réduction des émissions p_1 . A l'inverse, le vendeur a intérêt à vendre dès que le prix est non nul. Il est dès lors probable que la transaction se réalise puisqu'elle est bénéfique pour chacune des deux parties pour tout prix compris entre 0 et p_1 . Au regard de ces seules informations, la théorie économique est par contre incapable de déterminer à quel prix, dans cette fourchette, la transaction va effectivement se réaliser. D'autres éléments, et en particulier les rapports de force entre ces deux Parties, doivent être pris en compte.

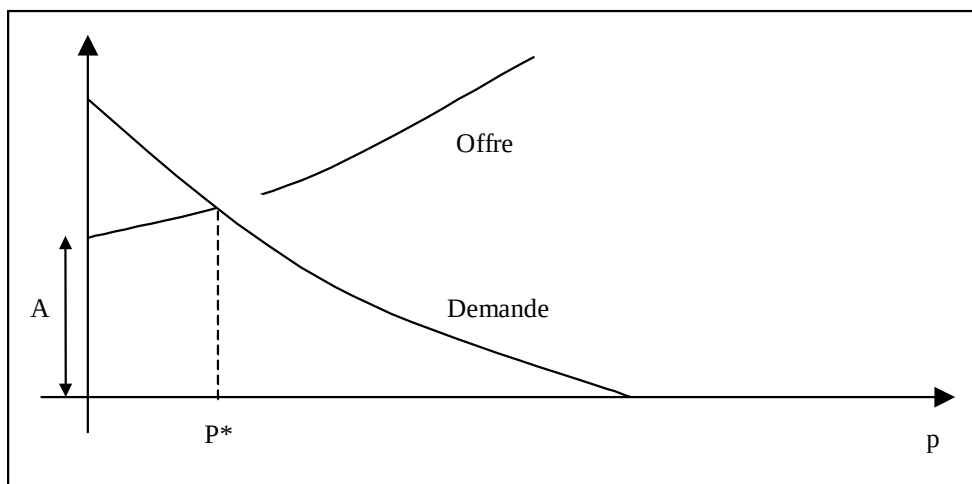


Figure 8.2 : Existence d'un équilibre de marché entre un pays offreur et un pays demandeur de permis d'émissions malgré la présence d'une quantité A de « hot air » en supposant que l'acheteur et le vendeur sont « price takers ».

Supposons maintenant que l'acheteur soit intéressé par une quantité A' de permis supérieure à A. Si les deux parties se comportent en « price takers », il existe alors un unique prix d'équilibre p^* . Les courbes d'offre du vendeur et la courbe de demande de l'acheteur se coupent en effet en un point unique (figure 8.2). Dans ce cas, tous les permis, y compris la quantité A de permis « fictifs », sont vendus à ce prix. Ce résultat repose cependant sur deux hypothèses discutables : le comportement de « price taker », et la non distinction entre permis « fictifs » et permis « réels ».

La seconde hypothèse est implicite dans la figure 8.2 : les permis « fictifs » sont considérés comme des permis comme les autres et vendus comme tels au même prix. En théorie, il serait possible de

découpler ces deux marchés sans pour autant modifier le prix d'équilibre sur le marché des permis « réels » (qui correspondrait à une égalisation des coûts marginaux de réduction des émissions). Une telle distinction n'est cependant pas prévue par le protocole de Kyoto.

La première hypothèse est par contre nettement plus difficile à justifier. Dans une configuration dans laquelle ce sont des Etats qui échangent les permis d'émissions négociables, et compte tenu des estimations sur les coûts d'abattement dans les différents pays de l'Annexe I, le marché devrait être partagé entre 2008 et 2012 entre deux vendeurs (Ukraine et Russie) et 35 acheteurs. Le risque de voir les Russes et les Ukrainiens adopter un comportement monopolistique (ou plutôt duopolistique) pour s'approprier une part supplémentaire de la rente est très grand.

Dans ce cas de figure, le prix des PEN s'établirait au dessus de p^* , avec des ventes Russes et Ukrainiennes moins importantes en volume, mais générant des revenus plus élevés. La situation serait globalement plus coûteuse pour la collectivité (Burniaux, 1998). Remarquons que le cas polaire d'un pouvoir de marché exercé par l'acheteur est tout aussi susceptible de se produire, en particulier si des bulles régionales (par exemple Russie - USA) sont mises en place.

Nous utiliserons malgré tout ces deux hypothèses dans le travail qui suit. Le « *hot air* » sera donc traité en supposant un marché de permis d'émissions négociables sur lequel tous les acteurs sans exception sont « *price takers* ». Sous ces hypothèses, nous sommes légitimes à représenter le marché des PEN par un marché parfait comme nous l'avons fait dans STARTS R. En ce qui concerne enfin les règles d'allocation des quotas au-delà de 2012, nous veillerons à éviter qu'elles n'introduisent un nouvel « *hot air* » tropical.

2.1.3. Conséquences des transferts financiers sur la croissance économique

La mise en place de politiques climatiques à l'échelle de la planète, et en particulier d'un marché de permis d'émissions négociables pouvant générer d'importants transferts financiers entre régions du monde, devrait avoir des impacts macroéconomiques importants. Quatre mécanismes principaux expliquent ces impacts :

- Le recyclage des flux financiers générés par le commerce des permis d'émissions négociables : gains pour les exportateurs nets de carbone¹¹ ou pertes liées à l'achat de permis et aux dépenses d'abattement domestiques pour les importateurs nets de carbone. Ces impacts dépendent principalement de la nature des agents qui font commerce des permis (états ou entreprises), de la manière dont sont financés les achats, et de l'utilisation qui est faite du produit des ventes.
- L'impact sur les marchés des énergies primaires (charbon, pétrole et gaz naturel) : cet impact pourrait s'avérer tout à fait important. Hotmark (1998) calcule par exemple que l'entrée en vigueur du Protocole de Kyoto devrait se traduire par une baisse de la demande pour le charbon, puis un peu plus tard pour le pétrole : les pays producteurs verraient ainsi leurs revenus diminuer, alors que l'impact sur les pays consommateurs est variable en fonction des élasticités de leur PIB aux prix de l'énergie.
- L'impact sur les marchés des biens intensifs en carbone et la compétitivité industrielle : la compréhension des impacts d'une modification des prix relatifs de l'énergie sur la localisation des industries intensives en énergie est essentielle pour estimer les « effets de fuite » des industries intensives en énergie vers les pays restant hors de l'annexe B (Manne, 1999, Becker, 1999).

¹¹ Nous appelons ici exportateurs nets de carbone les pays pour lesquels les coûts nets du changement climatique, c'est à dire la somme des coûts de réduction des émissions domestiques et des flux financiers générés par les transferts, sont négatifs. Ce sont les bénéficiaires nets de la politique climatique.

- L'impact sur les marchés des capitaux, les taux de change et le service de la dette : la mise en place de flux de capitaux très importants à la fois entre le Nord et le Sud et entre l'Ouest et l'Est pourrait avoir un impact significatif sur les marchés des capitaux et les taux de change, ce qui pourrait entraîner des changements non négligeables sur le service de la dette des pays en voie de développement (généralement libellée en dollars américains) (McKibbin *et al.*, 1998, Bernstein *et al.*, 1999).

Si les mécanismes économiques qui président à ces impacts sont plutôt bien connus, les paramètres qui en contrôlent la grandeur sont très difficiles à observer ou à déduire d'autres données économiques, et ce d'autant plus que nous nous intéressons au long terme. En outre, l'effet spécifique des politiques climatiques sur les grands indicateurs macroéconomiques est difficile à évaluer avec précision dans la mesure où ceux-ci dépendent aussi d'autres politiques macroéconomiques (politique monétaire, réduction des déficits publics, etc.). L'examen détaillé de ces impacts nécessiterait ainsi la construction d'une maquette très détaillée et la formulation d'hypothèses sur les politiques macroéconomiques qui seront suivies à très long terme. Une analyse aussi fouillée dépasse cependant largement le cadre de notre propos¹².

Nous nous limiterons ici à capturer de manière très simple l'effet de recyclage. Pour les pays exportateurs nets de carbone, nous supposons qu'une fraction connue des coûts des politiques climatiques provient de l'investissement, ce qui induit une baisse de la croissance. Pour les importateurs nets au contraire, nous supposons qu'une fraction connue des revenus générés par les politiques climatiques est réinvestie à un taux égal au taux de productivité marginal de l'économie considérée. Pour boucler le système, nous supposons que la hausse ou la baisse du PIB à la période suivante entraînera à son tour une modification de la trajectoire d'émissions par rapport à la référence.

Pour conserver le comportement individuel (8.2)-(8.3) de chaque région, nous supposerons que les agents échangent des PEN uniquement sur la base de leurs coûts d'abattement directs, sans inclure dans leurs calculs les bénéfices (ou les pertes) potentiels en termes de croissance. Cette hypothèse de « rationalité limitée » nous paraît raisonnable dans la mesure où, en pratique, les effets macroéconomiques de la mise en place d'un marché de PEN se révèlent particulièrement complexes et dépendants d'autres facteurs macroéconomiques non directement liés à la politique climatique. A chaque période, nous pouvons ainsi traiter successivement la résolution du marché de PEN (équations 8.6 et 8.7) puis le calcul des impacts macroéconomiques venant affecter la croissance et *in fine* les émissions de référence $\bar{E}_{rt}$.

En termes mathématiques, nous notons R_{rt} le revenu net généré par les transferts financiers, c'est-à-dire le flux généré par l'échange de permis moins les dépenses d'abattement domestiques (équation 8.8). Si σ_{rt} est la part de ce revenu net qui est réinvesti (si $R_{rt} > 0$) ou déduit de l'investissement (si $R_{rt} < 0$), ρ_{rt} la productivité marginale du capital, $g_{ref,rt}$ le taux de croissance du PIB dans le scénario de référence, alors le PIB à la période $t+1$ se déduit du PIB à la période t par l'équation de récurrence (8.9).

$$R_{rt} = p_t \cdot [Q_{ta,rt} - (1 - a_{rt}^*) \cdot \bar{E}_{rt}] - C(a_{rt}^*) \quad \text{Revenu net généré par la contrainte climatique (8.9)}$$

$$PIB_{r,t+1} = PIB_{rt} \cdot (1 + g_{ref,rt})^\Delta + \Delta \cdot \rho_{rt} \cdot \sigma_{rt} \cdot R_{rt} \quad (8.10)$$

Il reste à estimer l'impact sur les émissions de référence à la période $t+1$, impact qui dépend de la nature de l'élasticité PIB des émissions de CO₂. Nous supposons ici que l'élasticité PIB des émissions de CO₂ varie en fonction du temps. Sa valeur initiale est notée μ_r et le taux annuel de « décrochage » entre richesse et émissions est noté ν_r . Soit finalement :

¹² Le lecteur trouvera dans les modèles RICE (Nordhaus et Yang, 1996) ou G-Cubed (McKibbin *et al.*, 1998) des exemples de traitement assez complets des impacts macroéconomiques des politiques climatiques.

$$\bar{E}_{r,t+1} = \bar{E}_{r,t=0} \left(\frac{PIB_{r,t+1}}{PIB_{r,t=0}} \right)^{u_r + v_r \cdot t \cdot \Delta} \quad (8.11)$$

2.2. Calibration du modèle

2.2.1. Règles d'allocation des permis d'émissions négociables

Dans l'ensemble des règles d'allocation des permis d'émissions négociables décrites à la section 1.2, nous examinons ici la convergence par tête et la règle dite de Jacoby. Ces deux règles sont représentatives de deux approches polaires de l'élargissement de l'annexe B. La première traduit en effet une vision normative *a priori* dans laquelle la date d'entrée des pays en voie de développement dans l'annexe B, le quota d'émissions par tête final et la trajectoire suivie pour le rejoindre sont donnés *ex ante*. La seconde représente au contraire le type même d'un processus adaptatif dans lequel les quotas dépendent de l'évolution des conditions économiques. Nous gagnons ici en souplesse, mais au prix d'une moins grande sécurité quant à la concentration atmosphérique en CO₂ qui sera finalement atteinte.

a) Convergence par tête

Dans cette première règle, l'objectif est d'atteindre en 2100 une égalisation des quotas par tête. Avec un objectif aussi lointain, le chemin de transition est tout aussi important que l'objectif lui-même. Nous examinerons ici deux trajectoires de convergence différentes :

- Convergence linéaire avec élargissement de l'annexe B en 2030 : en 2010, les pays de l'annexe B réduisent leurs émissions comme prévu par le protocole de Kyoto, ils s'en tiennent aux mêmes valeurs en 2020 et commencent à converger linéairement vers leur objectif à partir de 2030. Les pays en voie de développement entrent dans le marché en 2030 puis commencent à converger linéairement vers l'objectif à partir de cette date.
- Convergence linéaire avec élargissement progressif de l'annexe B : dans ce second cas de figure, les pays en voie de développement rentrent dans l'annexe B uniquement lorsque leur PIB par tête dépasse le PIB par tête du Portugal en 1990 (avec 4990\$ par habitant, le Portugal était le pays de l'Union Européenne le moins riche en 1990).

Telle qu'elle est définie ci-dessus, il n'y a aucune raison pour que la règle de convergence par tête ne génère pas de « *hot air* », c'est-à-dire des quotas d'émissions supérieurs aux trajectoires de référence pour certains des pays considérés. Pour éviter ce cas de figure, nous supposons que les quotas sont autoritairement plafonnés aux émissions de référence de la région considérée. Remarquons enfin que comme nous l'avons noté en section 1.2.1, la règle de convergence telle qu'elle est définie ici peut se révéler contre incitative. Les pays entrants peuvent avoir intérêt à laisser dériver leurs émissions plus que de raison jusqu'à la date de leur entrée dans l'annexe B. Nous ne prendrons pas cette possibilité en compte ici.

b) Règle de Jacoby

Comme nous l'avons indiqué en section 1.2.4, la règle dite de Jacoby consiste à fixer *ex ante* un seuil de PIB par tête au-delà duquel les pays rentrent dans l'annexe B. Nous noterons PIB* ce seuil. Lorsque le pays dépasse cette richesse limite, le taux de croissance de ses émissions est à partir de cette date plafonné à un niveau d'autant plus faible que le pays devient plus riche. Le plafond devient finalement négatif, ce qui signifie que le pays concerné doit réduire ses émissions. Cette règle proposée par Jacoby *et al.* (1999) s'exprime mathématiquement de la manière suivante :

$$\text{Si } PIB_{r,t-1} < PIB^*, \text{ alors le pays est hors de l'annexe B } (r \notin B_t) \quad (8.12)$$

Si $PIB_{r,t-1} \geq PIB^*$, alors le pays est dans l'annexe B ($r \in B_t$) et son quota est donné par :

$$\begin{aligned} Qta_{r,t+1} &= \bar{E}_{r,t-1} + \Delta.[\gamma - \alpha(PIB_{r,t-1} - PIB^*)^\beta].\bar{E}_{r,t-1} \text{ s'il rentre pour la première fois ou par} \\ Qta_{r,t} &= Qta_{r,t-1} + \Delta.[\gamma - \alpha(PIB_{r,t-1} - PIB^*)^\beta].Qta_{r,t-1} \text{ sinon} \end{aligned} \quad (8.13)$$

Nous avons noté ici γ le taux de croissance des émissions autorisé pour les pays qui franchissent tout juste le seuil, et α et β les paramètres contrôlant la vitesse à laquelle la contrainte sur les émissions évolue. La règle de Jacoby est elle aussi susceptible de générer du « *hot air* », même si c'est de manière plus limitée.

2.2.2. Trajectoires d'émissions de référence

Le chapitre 7 nous a donné l'occasion d'examiner quelques uns des scénarios de référence les plus couramment utilisés dans la littérature. Les données disponibles pour les nouveaux scénarios du GIEC concernent seulement quatre grandes régions, ce qui est trop limité pour un modèle de simulation du marché des permis d'émissions négociables. Ces scénarios sont pourtant les seuls à présenter la possibilité d'une décroissance des émissions avant 2100 sans politique particulière en faveur de l'environnement, mais uniquement sous des hypothèses très optimistes en matière de décarbonisation. Le lien entre les niveaux de PIB par tête et les émissions étant très important, en particulier pour la règle de Jacoby, nous avons décidé de construire ici à titre d'illustration nos propres scénarios régionaux basés sur les hypothèses suivantes.

En premier lieu, pour limiter le nombre de combinaisons possibles, nous choisissons des dynamiques d'évolution de la population identiques quel que soit le scénario de croissance retenu. Nous utilisons pour ce faire les projections régionales du scénario IS92a (légèrement remaniées pour nous adapter au découpage régional un peu différent que nous utilisons ici). Nous ne formulons donc finalement des hypothèses que sur les deux derniers termes de l'identité réduite suivante :

$$CO_2 = POP \frac{PIB}{POP} \frac{CO_2}{PIB} \quad \text{Identité de Kaya réduite} \quad (8.14)$$

Nous donnons à chacun des deux paramètres restants (PIB par tête et intensité carbone du PIB) deux valeurs hautes et basses, ce qui nous donne finalement quatre combinaisons. En ce qui concerne la croissance économique tout d'abord, nous formulons une hypothèse haute (notée dans la suite H) et une hypothèse basse (notée B) qui sont définies de la manière suivante :

- Le scénario de croissance haute (H) suppose un taux de croissance annuel du PIB de 1,8% par an en moyenne dans les pays développés d'ici à 2100 (2% dans les anciens pays de l'est) et de 4% pour les pays du Sud, soit un taux de croissance annuel moyen du PIB par tête de 2,20% entre 1990 et 2100.
- Le scénario de croissance basse (B) postule au contraire un taux de croissance du PIB de 1,5% dans tous les pays de l'annexe B et de 3% dans les pays en voie de développement, soit un taux de croissance annuel moyen du PIB par tête de 1,43% par an entre 1990 et 2020.

Les deux hypothèses que nous retenons ici se situent pour la première dans le haut et pour la seconde dans le bas de la fourchette des scénarios étudiés au chapitre 7. En ce qui concerne les liens entre croissance économique et croissance des émissions, nous formulons aussi deux hypothèses :

- Dans le premier cas (noté sans imagination a), le changement technique est supposé suffisamment rapide pour faire plus que compenser en 2100 les émissions additionnelles induites par la croissance économique. L'élasticité revenu des émissions de CO_2 devient à terme négative.
- Dans le second cas (noté b), l'effet volume est supposé rester déterminant durant tout le XXI^e siècle. De ce fait, l'élasticité revenu des émissions de CO_2 reste toujours positive d'ici à 2100.

Formellement, les coefficients μ_r et v_r sont ajustés « à la main » de telle sorte que nous obtenions dans le cas a des élasticités négatives en 2100, et dans le cas b des élasticités toujours positives à cette date. Nous avons en outre cherché à obtenir des scénarios d'émissions restant régionaux contrastés, mais restant dans les fourchettes définies par les grands scénarios de référence étudiés au chapitre 7.

Emissions de CO ₂ en 2100 selon le scénario considéré (GtC/an)		Croissance économique	
		Elevée : H	Faible : L
Elasticité PIB des émissions de CO ₂	Elevée : a	10 GtC/an	13 GtC/an
	Faible : b	20 GtC/an	14 GtC/an

Tableau 8.2 : Emissions de CO₂ en 2100 (GtC/an) dans les 4 scénarios Ha, Hb, La, Lb.

Le tableau 8.2 présente les niveaux d'émissions obtenus en 2100. La figure 8.3 reprend les trajectoires de la trajectoire d'émissions de référence pour les quatre scénarios Ha, Hb, La et Lb. Le lecteur trouvera en annexe 4 la description complète de ces quatre scénarios de croissance. L'objectif d'obtenir une gamme assez large de scénarios est bien atteint, même si la fourchette d'émissions à 2100 (10 GtC) reste modeste par rapport à celle de IS92 ou des IS98 (21 GtC en 2100 entre IS98a2 et IS98b1). Si nous reprenons scénario par scénario, nous obtenons les points de comparaison suivants :

- La trajectoire d'émissions du scénario Ha est très proche de celle du scénario IS98a1 (Morita *et al.*, 1998). Les logiques internes de ces deux scénarios sont en effet comparables (croissance très élevée et très important progrès technique). Le scénario Hb formule ainsi les mêmes hypothèses de décarbonisation que IS98a1 (baisse de 2,3% par an de l'intensité CO₂ du PIB), mais avec un taux de croissance du PIB par tête plus faible que celui de IS98a1 (2,20% contre 2,67%) qui compense un taux de croissance de la population plus élevé.
- Les émissions du scénario Hb sont similaires à celles du scénario IIASA&WEC A2 (Nakićenović *et al.*, 1998). Encore une fois, les logiques internes de ces deux scénarios sont identiques : taux de croissance élevé avec faible diminution de l'intensité carbone. Hb présente cependant un taux de croissance du PIB par tête plus élevé que celui de A2 (2,20% contre 1,72%) mais fait des hypothèses plus optimistes sur la décarbonisation (-1,76% contre -1,22%).
- Le scénario La est le plus atypique. Sa trajectoire d'émissions est en effet identique à celle de Hb jusqu'en 2040, puis elle s'incurve nettement vers le bas. Ce scénario basé sur un taux de croissance faible et un découplage assez rapide entre émissions et PIB peut être interprété soit comme un scénario très peu environnementaliste, mais très optimiste sur les coûts des technologies « *backstop* » susceptibles de venir remplacer les énergies fossiles, soit au contraire comme le récit du succès d'un immense programme technologique qui concentre tous les moyens disponibles dès aujourd'hui pour le développement de la technologie ultime à l'horizon du milieu du siècle prochain.
- Le scénario Lb enfin est très proche du scénario IS98b2 (Riahi and Roehr, 1998). Le taux de croissance est un peu plus élevé dans IS98b2 (1,58% contre 1,43%) mais les hypothèses sur la décarbonisation sont plus faibles (-1,31% contre -1,49% dans IS98b2).

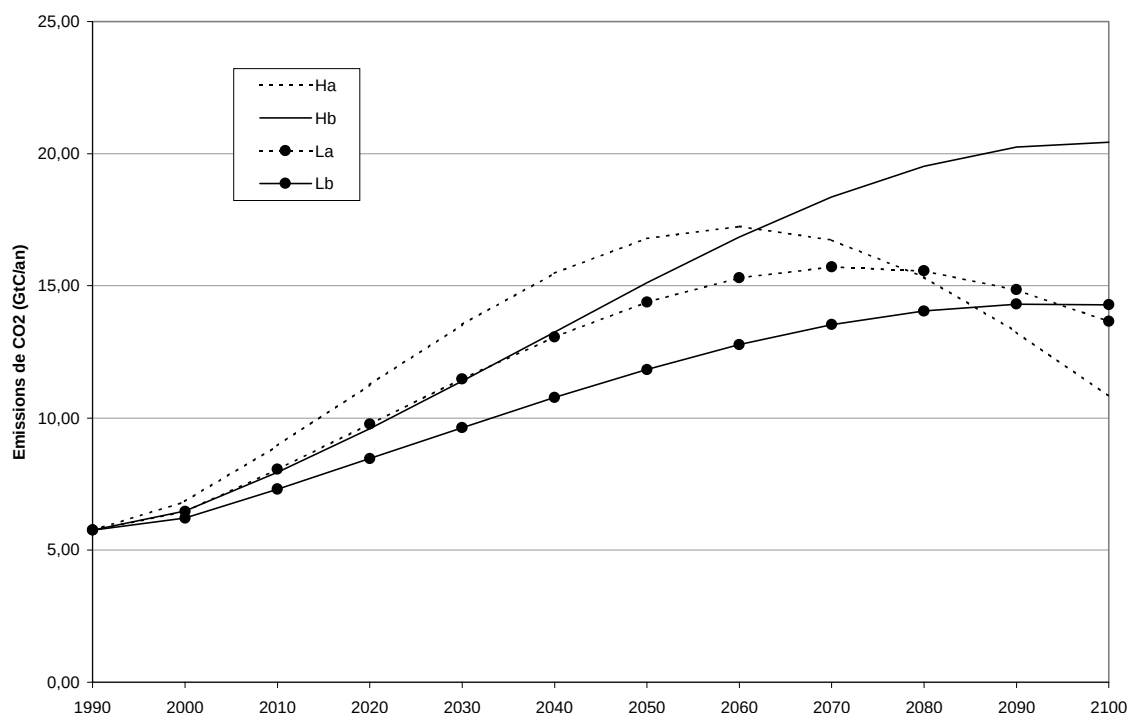


Figure 8.3 : Evolution des émissions de CO₂ d'origine fossile dans les 4 scénarios de référence Ha, Hb, La et Lb (en GtC par an). Les scénarios avec croissance faible (L) sont repérés avec des ronds noirs. Les trajectoires à élasticité PIB des émissions élevées sont en traits pointillés (scénarios a), les trajectoires à élasticité PIB des émissions faibles en trait plein (scénarios b).

2.2.3. Fonctions de coûts de réduction des émissions régionales

Nous calibrons les fonctions d'abattement C_{it} du modèle STARTS R à partir d'une série de résultats de simulations tirées du modèle SGM (Edmonds *et al.*, 1997, IAT, 1997 et des résultats non publiés qui nous ont été gracieusement communiqués par Jae Edmonds et Ron Sands). Dans chacune des simulations dont nous disposons, nous identifions le prix des permis donné par SGM avec le coût marginal d'abattement dans chacune des régions présentes sur le marché. Les agents se comportent en dans SGM comme des « *price-takers* » et arbitrent entre abattement domestique et échange de permis en maximisant uniquement leur revenu total, soit un comportement analogue à celui représenté par le modèle (8.2)-(8.3). En travaillant sur plusieurs jeux de simulations, nous avons ainsi pu reconstruire des courbes de coûts d'abattement agrégées implicites de SGM (Le Pesant, 1997).

Les fonctions de coûts d'abattement C_{it} présentent cependant la particularité de ne dépendre que du niveau d'abattement présent a_{it} . Les coûts d'abattement sont ainsi supposés indépendant tant de la trajectoire d'abattement passée que des anticipations sur les niveaux d'abattement futurs. En utilisant des données issues d'un modèle aussi complexe et précis sur le plan technique que SGM, nous courrions le risque d'obtenir un nuage de points (niveau d'abattement, coûts d'abattement) impossible à approximer par quelque fonction de coûts que ce soit du fait de la dépendance des coûts à la trajectoire passée des abattements. Or nous calculons au contraire facilement des courbes de coûts sur la base des données de SGM. Ceci signifie que les coûts d'abattement de SGM à un instant donné sont faiblement dépendants de la chronique passée des abattements. Autrement dit, l'inertie implicite de SGM, au moins sur les simulations auxquelles nous avons eu accès, reste faible.

CNZ	Canada, Nouvelle-Zélande, Australie
WEU	Union Européenne, Suisse, Norvège,
USA	USA
JAP	Japon

FSU	Russie et pays en transitions de l'annexe I
IND	Inde
CHI	Chine
ROW	Reste des pays non membres de l'annexe I

Tableau 8.3 : Régions du monde du modèle d'équilibre du marché des permis

Nous avons ainsi obtenu des courbes de coûts d'abattement pour les 8 groupes de pays énumérés dans le tableau 8.3. Les coûts de réduction des émissions obtenus se révèlent nettement plus élevés au Nord qu'au Sud (voir figure 8.4). Trois arguments peuvent expliquer cette différence : l'écart entre les efficacités énergétiques du Nord et du Sud, les taux de croissance plus élevés au Sud qui génèrent plus d'opportunités d'abattement et enfin le fait que les taux de change ne reflètent pas les coûts de la vie réels dans les différents pays.

Cette explication peut cependant être discutée. A court terme en effet, la faiblesse de l'offre de capitaux disponibles pour le Sud, les durées de vie moyennes des équipements plus longues et les risques plus importants au Sud peuvent contribuer à diminuer l'écart des coûts de réduction des émissions. A long terme, la diffusion technologique ainsi que les effets de change peuvent contribuer à réduire à nouveau l'écart des coûts entre pays développés et pays en voie de développement. L'incertitude sur les coûts étant très importante, nous examinerons une hypothèse alternative dans laquelle nous fixerons autoritairement les coûts 20% plus élevés au Sud et 20% plus faibles au Nord.

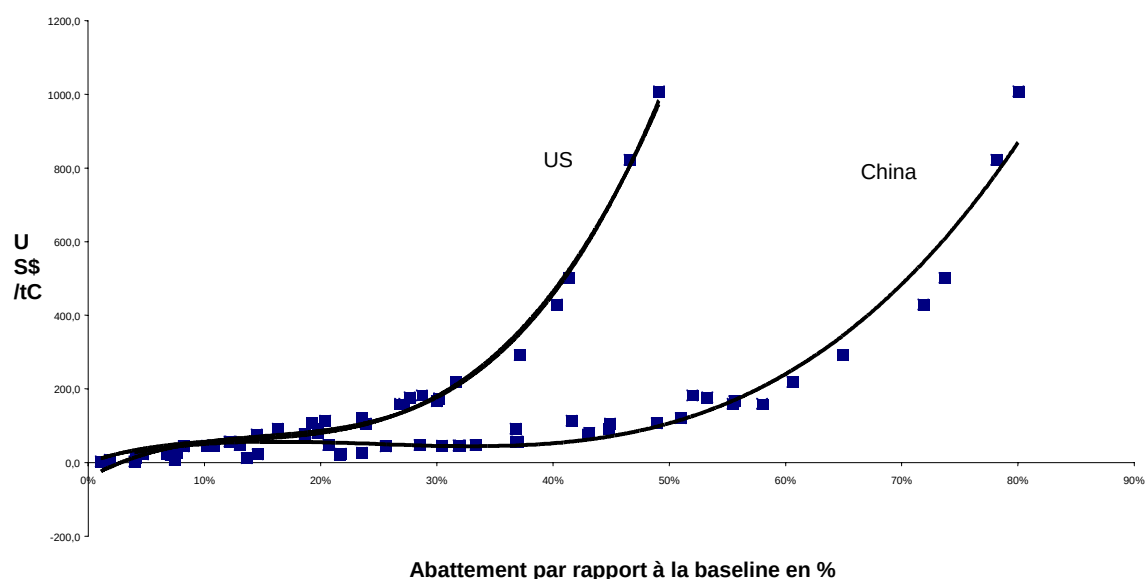


Figure 8.4 : Courbes de coûts marginaux de réduction des émissions (en \$90 par tonne de carbone) pour la Chine et pour les USA en 2010 (source : Le Pesant, 1997).

Mais la limitation principale liée à l'utilisation des courbes de coûts de réduction des émissions issues de SGM est que nous coupons tout lien entre les trajectoires de référence et les coûts, ce qui constitue bien entendu une position très inconfortable. Ne disposant pas aujourd'hui d'un outil nous permettant de produire de manière endogène nos propres courbes de coûts de réduction des émissions, nous sommes cependant contraints de procéder ainsi. Il reste néanmoins tout à fait important d'examiner ce point dans de futurs travaux de recherche.

2.2.4. Calibration des règles de convergence

Nous comparons les différentes règles d'allocation des quotas d'émissions de CO₂ en ajustant leurs paramètres de telle sorte que la concentration atmosphérique en CO₂ soit stabilisée à 450, 550 ou 650

ppm en 2100. Nous utilisons pour ce faire le module de passage émissions-concentrations développé au chapitre 1. Etant donné la diversité des trajectoires de référence possibles, la cible en concentration à long terme ne peut être qu'indicative :

- Pour la règle de Jacoby : les efforts de réduction des émissions qu'elle impose sont en effet dépendants de la trajectoire d'émissions et de croissance économique de référence. Nous supposons ici que les paramètres de la règle sont donnés une fois pour toutes sur la base de la moyenne des quatre scénarios de référence disponibles. Pour une cible à 550 ppm, la concentration finale en CO₂ varie ainsi entre 508 et 574 ppm.
- Dans le cas de la convergence, il existe aussi une incertitude liée au niveau d'émissions des pays en voie de développement en 2030, date de leur entrée dans l'annexe B. Nous procédons donc de la même manière en calculant les niveaux de quota par tête en 2100 sur la base d'une référence moyenne. Dans ce cas cependant, l'incertitude sur le niveau de concentration final est beaucoup plus faible, puisque la concentration finale s'étale entre 535 et 557 ppm.

Nous obtenons finalement les résultats suivants :

Cible	Quota d'émissions par tête en 2100
450 ppm	0,25 tC/hab.
550 ppm	0,57 tC/hab.
650 ppm	1,25 tC/hab.

Tableau 8.4 : Niveau d'émissions par tête en 2100 (en tonnes de carbone par individu) permettant de satisfaire la contrainte de non-dépassement de la cible climatique dans le cas d'une convergence linéaire des pays de l'actuelle annexe B dès 2020, et d'une entrée des pays en voie de développement dans le processus en 2030.

Cible	w* (\$ per tC)	α	β	γ
450 ppm	2400	0,003	0,2	0,01
550 ppm	3000	0,003	0,2	0,0185
650 ppm	3500	0,003	0,2	0,025

Tableau 8.5 : paramètres w*, α , β et γ de la règle de Jacoby permettant de ne pas dépasser la cible de concentration donnée.

Notons pour terminer que différents jeux de coefficients peuvent mener avec la règle de Jacoby aux mêmes niveaux de concentration finale. Ce point est tout à fait important dans la mesure où il nous permet de choisir différents niveaux de seuils d'entrée des pays en voie de développement w*. A cible environnementale donnée, nous avons ainsi le choix entre une entrée rapide des pays non annexe B dans le marché (faibles valeurs de w*) ou une entrée plus échelonnée, mais compensée par une contrainte plus forte sur les pays déjà dans le jeu (faible valeur de β et α élevé par exemple). Nous ne développerons pas cette discussion dans ce travail.

2.2.5. Implémentation informatique

Le modèle STARTS R est codé sous le langage GAMS et résolu par les solveurs non linéaires GAMS/MINOS et GAMS/CONOPT. Le code informatique du modèle STARTS R est présenté dans l'annexe 5.

$$(8.6) \quad \frac{dC_{1t}}{da}(a_{1t}^*) = \frac{dC_{2t}}{da}(a_{2t}^*) = \dots = \frac{dC_{Nt}}{da}(a_{Nt}^*) = p_t \quad \forall t \in B_t \quad \begin{array}{l} \text{Egalisation des coûts marginaux} \\ \text{d'abattement entre régions à chaque} \\ \text{période} \end{array}$$

(8.7)	$\sum_{r \in B_t} (1-a_{rt}^*) \cdot \bar{E}_{rt} = \sum_{r \in B_t} Q_{ta_{rt}}$	<i>Sous contrainte de satisfaction de la contrainte d'émissions</i>
(8.8)	$R_{rt} = p_t \cdot [Q_{ta_{rt}} - (1-a_{rt}^*) \cdot \bar{E}_{rt}] - C_{rt}(a_{rt}^*)$	<i>Revenu net des transferts de PEN</i>
(8.9)	$PIB_{r,t+1} = PIB_{rt} \cdot (1+g_{ref_{rt}})^\Delta + \Delta \cdot \rho_{rt} \cdot \sigma_{rt} \cdot R_{rt}$	<i>PIB à la période t+1</i>
(8.10)	$\bar{E}_{r,t+1} = \bar{E}_{r,t=0} \left(\frac{PIB_{r,t+1}}{PIB_{r,t=0}} \right)^{\mu_r + \nu_r \cdot t \cdot \Delta}$	<i>Emissions à la période t+1</i>

Tableau 8.6 : Présentation synthétique des équations du modèle STARTS R

C_{rt}	Coûts d'abattement régionaux	donnée régionale (\$90/% abattement)
a_{rt}^*	Niveau optimal d'abattement par rapport à la référence	variable (%)
$\bar{E}_{rt}$	Emissions annuelles de référence	variable (GtC/an)
$Q_{ta_{rt}}$	Quota d'émissions annuel	donnée exogène ou variable selon la règle de convergence
R_{rt}	Revenu annuel tiré du commerce des PEN	variable (10^9 \$90/an)
PIB_{rt}	PIB régional	variable (10^9 \$90/an)
$g_{ref_{rt}}$	Taux de croissance du PIB de référence	donnée régionale(%)
Δ	Durée d'une période	10 ans
ρ_{rt}	Taux de productivité marginal du capital	donnée régionale(%)
σ_{rt}	Fraction des revenus recyclés en investissement (ou venant en déduction des investissements)	80%
μ_r	Elasticité PIB des émissions	donnée régionale
ν_r	Taux de variation annuelle de l'élasticité PIB des émissions	donnée régionale
T	Nombre total de périodes	11

Tableau 8.7 : Présentation synthétique des variables et des paramètres du modèle STARTS R. Notons que la classification entre variables et paramètres est ici plus confuse puisque le fonctionnement du modèle STARTS R induit une trajectoire de croissance et d'émissions qui représente une variation par rapport à la trajectoire de croissance et d'émissions de référence (voir annexe 4).

3. Première évaluation de la stabilité des règles de convergence et de Jacoby

Nous utilisons maintenant le modèle STARTS R pour examiner dans quelle mesure la distribution des coûts d'abattement générée par les règles de convergence par tête et de Jacoby sont sensibles aux anticipations sur la croissance à long terme. Cette analyse nous permettra de fournir un premier élément pour apprécier la négociabilité des différentes règles d'allocation des quotas d'émissions de CO₂. En second lieu, nous avons vu au chapitre 4 que distribuer les coûts d'abattement au prorata du PIB par tête correspond à un équilibre coopératif de premier rang si les différents pays s'accordent sur un taux d'actualisation commun dans le cadre du changement climatique (« solidarité universelle »). La distance entre la distribution des coûts résultant de telle ou telle règle et cette distribution de référence nous donnera ainsi un second indicateur permettant d'évaluer la négociabilité des règles d'attribution des quotas considérés. Nous nous intéressons ici principalement au comportement du modèle d'ici à 2050. Nous verrons que cet intervalle de temps est suffisant pour nous faire une bonne idée de la robustesse des règles d'allocation des quotas d'émissions. Cet horizon présente en outre l'avantage de nous cantonner à la période de temps pour laquelle les incertitudes sont les plus faibles.

3.1.1. Comportement dynamique du marché des permis d'émissions négociables en situation d'incertitudes

Avant d'entrer dans le vif du sujet et d'examiner les conséquences distributives des règles d'allocation des quotas de réduction des émissions, il est crucial d'analyser leur impact respectif sur le marché des permis d'émissions négociables. Dans un système de coordination par les quantités avec un marché de PEN, le prix des permis constitue en effet l'unique signal par lequel les agents sont incités à entreprendre des efforts de réduction des émissions. De la forme de ce signal dépend donc la nature des réductions d'émissions que les agents privés vont être incités à entreprendre.

a) Le marché permet de diminuer grandement les coûts d'abattement

Le résultat le plus robuste de nos simulations est le suivant : quel que soit le scénario de référence, le commerce de permis d'émissions négociables permet de réduire les coûts d'abattement totaux pour toute la société de manière substantielle. Pour donner un ordre de grandeur, les coûts sont divisés en moyenne par trois lorsque nous passons de pas de marché du tout à un marché au sein de l'ensemble de l'annexe B. En outre, quelle que soit la distribution initiale des permis d'émissions négociables, toutes les parties y ont intérêt.

Ce résultat suggère que tant la règle de Jacoby que la règle de convergence par tête génèrent des contraintes qui sont loin d'égaliser les coûts marginaux de réduction des émissions. Les évaluations des coûts d'abattement que nous utilisons donnent en effet des coûts d'abattement élevés au Nord et faibles au Sud, alors que les deux règles que nous utilisons impliquent au contraire une contrainte climatique importante au Nord et plus limitée au Sud.

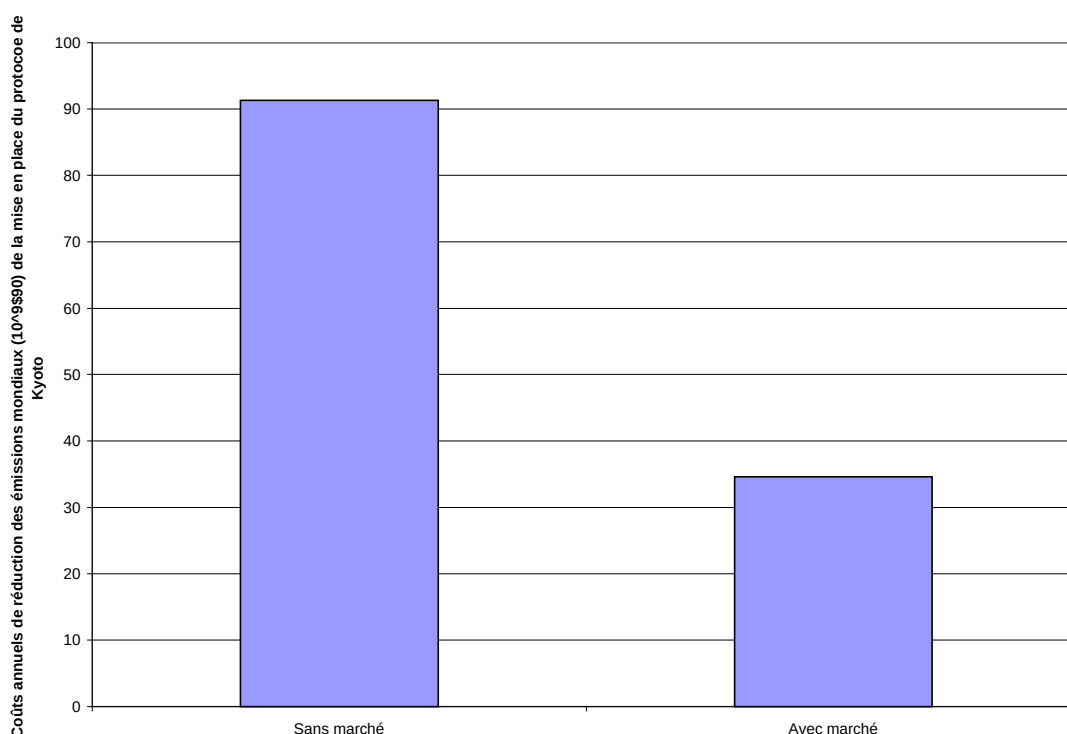


Figure 8.5 : Coûts annuels de la mise en place du protocole de Kyoto avec ou sans marché (en milliards de dollars 1990 par an)

Ce résultat est bien entendu « contenu dans le modèle » qui représente un marché parfait de permis d'émissions négociables. Nous pouvons néanmoins nous interroger sur la nature des imperfections de marché susceptibles de compenser en statique les gains substantiels que nous mettons ici en évidence.

En dynamique par contre, la capacité d'un système de permis à générer des abattements importants est discutable, comme nous allons le voir en examinant la dynamique des prix des permis.

b) La dynamique des prix des permis varie fortement en fonction de la règle de convergence retenue

Les prix des permis sont donnés par les figures 8.6 et 8.7 respectivement pour la convergence et pour la règle de Jacoby. Les prix en 2010 sont comparables (entre 50\$ et 70\$ par tonnes de carbone¹³), mais les prix à moyen terme diffèrent de manière très importante.

- Dans le scénario convergence, les prix augmentent de manière significative en 2020 (de 75 à 130\$ par tonnes de carbone) avant de redescendre en 2030 du fait de l'entrée massive des pays en voie de développement dans l'annexe B, ce qui amène une quantité non négligeable d'opportunités d'abattements à faibles coûts dans le système¹⁴.
- En ce qui concerne la règle de Jacoby, les prix augmentent plus doucement mais de manière continue (de 55 à 105\$ par tonne de carbone en 2020, et de 75 à 180\$ par tonnes en 2030). Ce résultat s'explique par le fait que les pays en voie de développement intègrent le marché de manière échelonnée, la Chine rentrant en 2020, ROW en 2020 (cas H) ou en 2040 (cas B) et l'Inde en 2030 (cas H) ou en 2040 (cas B). Nous notons en outre que dans cette règle, le prix des permis suit une trajectoire très différente selon que les hypothèses sur la croissance sont hautes ou basses. La raison en est que les quotas d'émissions deviennent maintenant dépendants de la croissance économique.

Nous constatons ici que la règle de convergence par tête génère un signal prix « en dents de scie ». La capacité d'un tel signal à générer des réductions d'émissions significatives dans les secteurs économiques les plus rigides est pour le moins discutable. Si les agents anticipent en effet une baisse future du prix des permis, en particulier s'ils anticipent l'entrée des PVD dans l'annexe B, ils peuvent avoir intérêt à différer les investissements les plus lourds pour profiter de quotas d'émissions à prix faible dans le futur. Le risque est ici très grand de voir tout le monde camper sur des positions attentistes, ce qui nous placerait dans une configuration de vulnérabilité forte par rapport aux risques de « surprise climatique », ou de découverte que les gisements d'opportunités de réduction des émissions à bas coûts espérés dans les PVD ne sont pas aussi importants que prévu. Nous ne pouvons cependant ici que décrire ce mécanisme, qui demanderait à être chiffré, en couplant un modèle à deux secteurs comme STARTS 2 avec un modèle de simulation du marché des PEN prenant en compte les anticipations des agents.

De ce point de vue, la règle de Jacoby apparaît plus vertueuse, en ce sens que l'élargissement progressif de l'annexe B aux PVD génère un signal prix des permis plus lisse. Il faut cependant bien noter que la forme du signal prix représenté sur la figure 8.7 traduit le fait qu'à aucun moment l'entrée d'un pays en voie de développement dans l'annexe B n'offre des opportunités d'abattement suffisantes tant en coût qu'en volume pour faire baisser le prix mondial des PEN. Le fait que le prix ne baisse pas traduit donc un équilibre entre des opportunités d'abattement qui restent abordables pour les pays développés d'une part, et des opportunités d'abattement pas trop nombreuses ou à prix pas trop faible au sein du nouvel arrivant.

¹³ Ces chiffres sont tout à fait comparables avec les projections des principaux modèles de la littérature : 64\$ par tonne de carbone pour POLES, 76\$ par tonne de carbone pour SGM, 37\$ par tonne de carbone pour G-Cubed, 114\$ par tonne de carbone pour MERGE ou 67\$ par tonne de carbone pour GREEN (Van der Mensbrugghe, 1998).

¹⁴ Cette baisse des prix dépend cependant de l'hypothèse selon laquelle les gisements de réduction des émissions à bas coûts restent inchangés dans les pays en voie de développement d'ici à 2030. Il s'agit d'une supposition très forte, que nous n'avons pas les moyens d'examiner correctement pour le moment, mais qu'il s'agit d'évaluer avec précision. De la même manière, nous ne tenons pas compte ici des dangers d'une mauvaise utilisation des ressources générées par le commerce dans les pays en voie de développement, risque dont plusieurs pays exportateurs de pétrole ont pourtant fait l'expérience après la hausse subite des prix du pétrole en 1973.

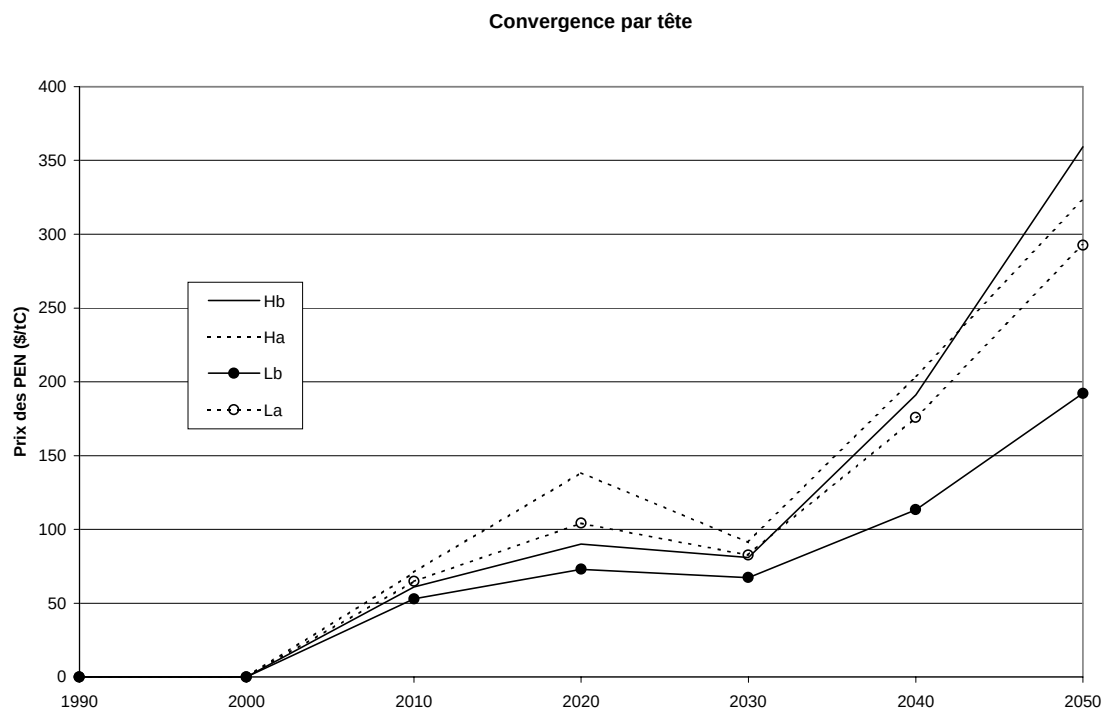


Figure 8.6 : Trajectoires de prix des permis pour la règle de convergence (dollars par tonne de carbone).

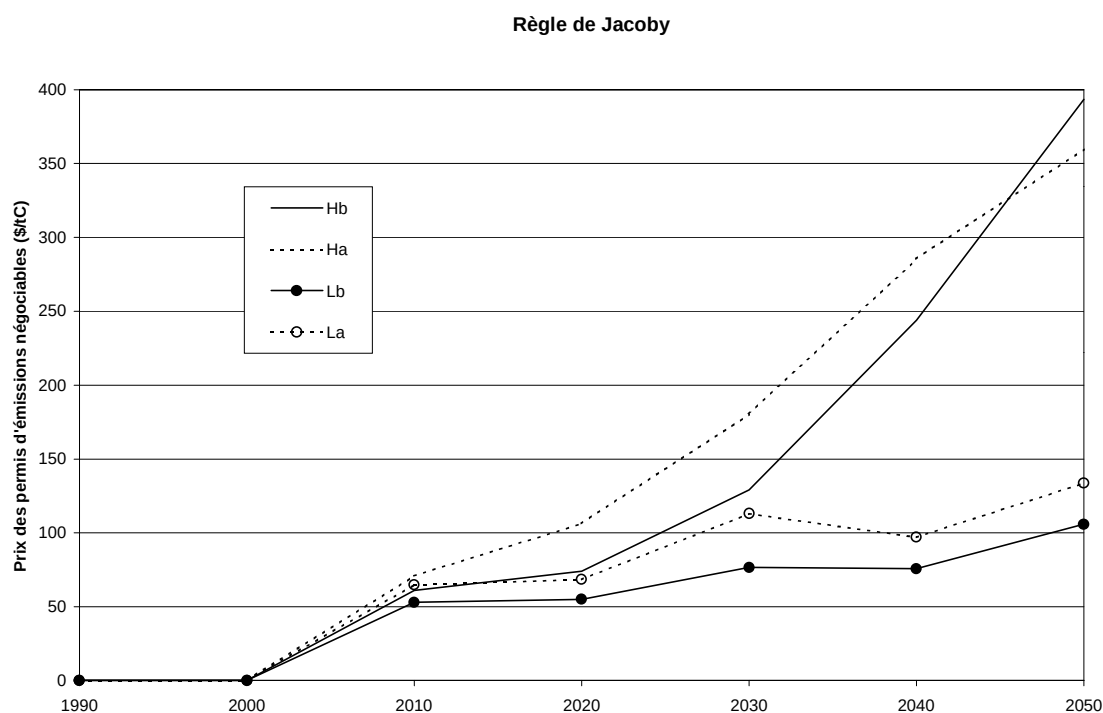


Figure 8.7 : Trajectoires de prix des permis pour la règle de Jacoby pour les quatre scénarios de référence (en dollars par tonne de carbone).

La progressivité de l'élargissement ne garantit donc pas à elle seule la stabilité du signal-prix. Bollen *et al.* (1999) considèrent ainsi une procédure d'entrée des pays en voie de développement dans l'annexe B similaire à celle de Jacoby, mais avec un seuil fixé beaucoup plus haut : les pays en voie de développement intègrent en effet l'annexe B lorsque leur PIB par tête atteint 10000\$. Dans ce

contexte, les pays en voie de développement, représentés ici par six régions distinctes, intègrent l'annexe B de manière encore plus échelonnée entre 2025 et 2065. Néanmoins, le signal prix obtenu est en dents de scie. Dans ce cas en effet, l'annexe B subit pendant plus longtemps à elle seule l'ensemble du fardeau climatique. Le coût marginal d'abattement y devient donc très élevé, et l'entrée d'un pays en voie de développement dans le jeu crée ainsi un appel d'air d'autant plus important.

c) Les flux internationaux de PEN sont très élevés

Règle de convergence

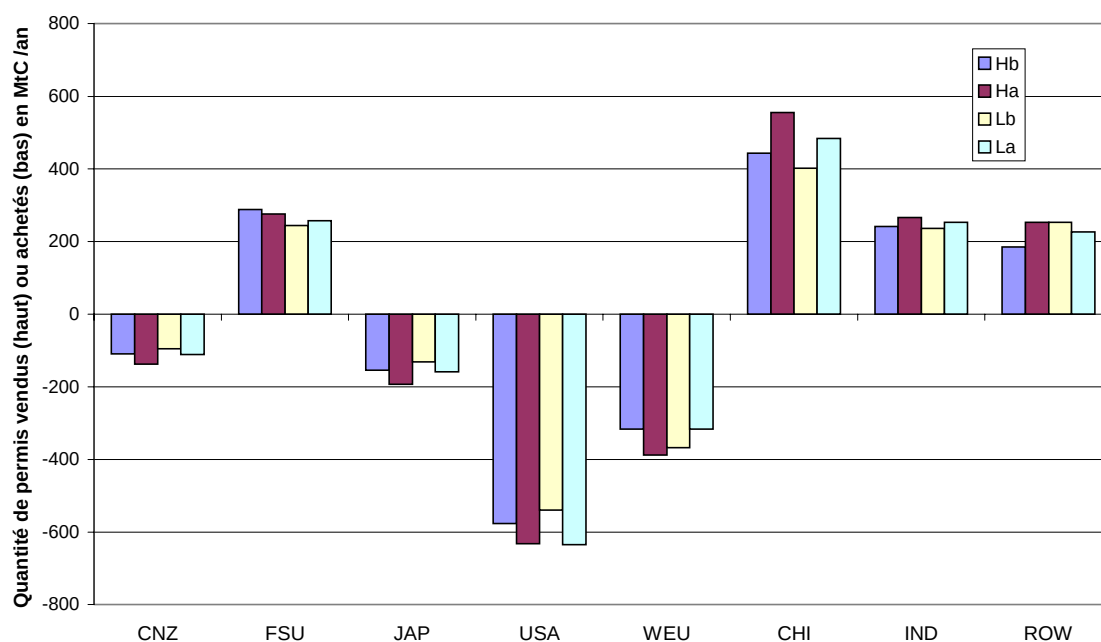


Figure 8.8 : Quantités de permis échangées en 2030 pour la règle de convergence par tête (MtC).

Règle de Jacoby

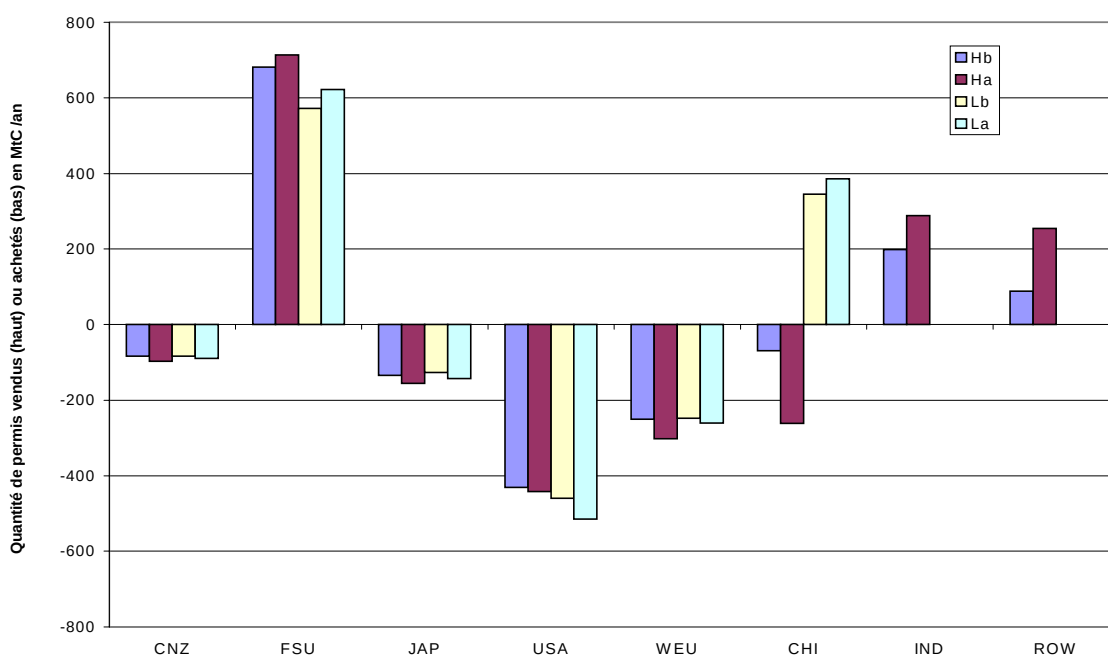


Figure 8.9 : Quantités de permis échangées en 2030 pour la règle de Jacoby (MtC/ann).

Les figures 8.8 et 8.9 représentent les quantités de permis d'émissions négociables échangées en 2030 dans les cas convergence et Jacoby. Globalement, ces flux sont importants (entre 900 et 1350 MtC par an) entre les principaux acheteurs (WEU, USA, JAP, CNZ et CHI dans certains cas) et les principaux vendeurs (FSU, IND, ROW et CHI dans certains cas). Mais pour la Chine comme pour les ex-pays de l'est, le tableau est très différent selon que l'on se trouve dans la règle de convergence par tête ou dans la règle de Jacoby. Les ventes de permis de FSU augmentent en effet de manière substantielle dans le cas Jacoby, bien plus que dans le cas convergence par tête, alors que le mouvement inverse se produit pour la Chine.

d) Deux cas particuliers : la Russie et la Chine

Pour la Russie et les anciens pays de l'est, l'écart que nous observons entre la règle de Jacoby et la règle de convergence s'explique par le fait que dans le second cas, les allocations de quotas sont beaucoup plus restrictives que dans le premier. Les ex-pays de l'est constituent en effet un groupe de pays très particuliers : ils appartiennent à l'annexe B mais sont relativement pauvres par rapport aux autres pays de cette même annexe. Ces pays sont donc désavantagés dans le cas de la convergence par tête, puisqu'ils réduisent leurs émissions dès 2020, alors que la règle de Jacoby tient compte de leur plus faible niveau de richesse et leur permet ainsi encore d'augmenter leurs émissions jusqu'en 2060. La quantité d'air chaud dont disposent alors les pays de l'est change alors du tout au tout (figure 8.10).

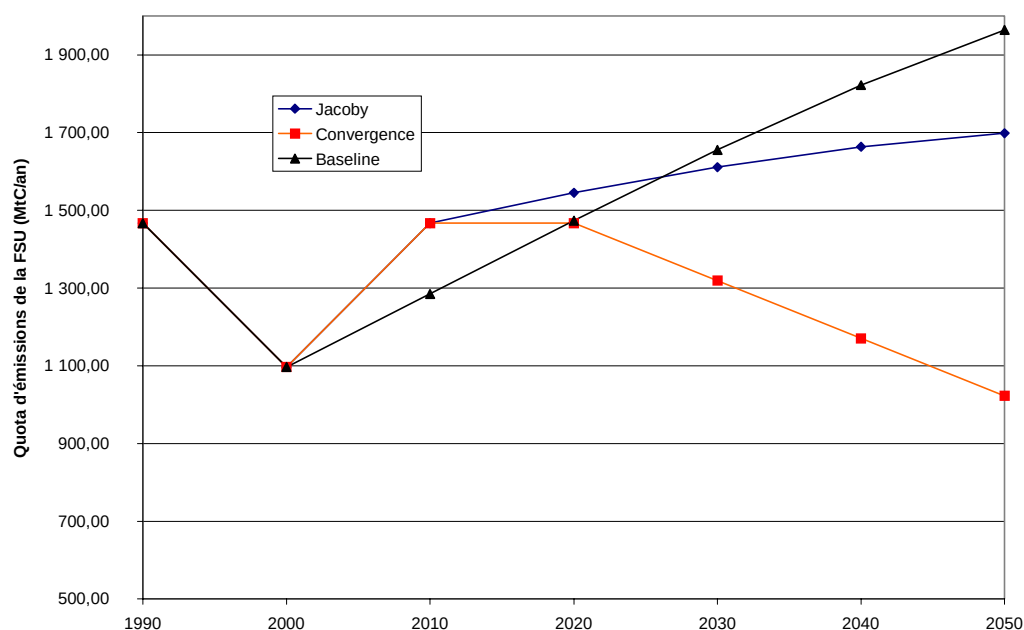


Figure 8.10 : quotas d'émissions de la région FSU selon la nature de la règle de convergence adoptée (en mtC par an).

Le même mécanisme est à l'œuvre pour la Chine, mais cette fois-ci en sens inverse. Dans le cas de la convergence par tête, la Chine n'intègre le marché qu'en 2030 et commence donc à converger à partir de ce point là. Par contre, dans le cas de la règle de Jacoby (et pour un scénario de croissance élevée), la Chine commence à réduire ses émissions dès 2020 (figure 8.11).

De fait, simplement sur la base des quantités échangées, deux acteurs clé pour les politiques de prévention du réchauffement climatique, la Chine et la Russie, ont *a priori* des positions opposées sur le choix entre règle de Jacoby et règle de convergence par tête.

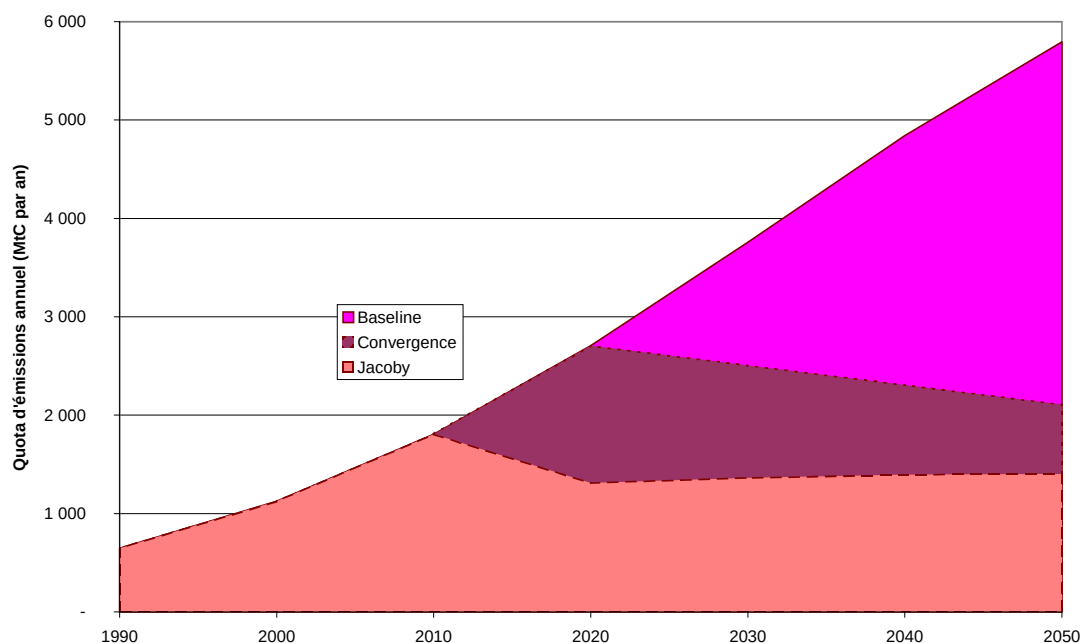


Figure 8.11 : quotas d'émissions de la Chine selon la nature de la règle de convergence adoptée (en mtC par an).

e) Des transferts financiers très importants de l'Ouest vers l'Est, et du Nord vers le Sud

Les flux financiers associés à ces échanges de permis sont particulièrement importants, et l'on peut s'interroger sur leur réalisme. Dans le cas de la Russie, le flux financier en 2010 varie entre 29 et 48 milliards de dollars par an. Un tel chiffre demande pour le moins à être discuté : Baron (1999) rappelle que les ventes de gaz de la Russie rapportent aujourd'hui à ce pays 10 milliards de dollars par an. Dès lors, des configurations comme celles de la règle de Jacoby dans laquelle les Russes deviennent, du fait du *hot air* exportateurs de permis pour des montants variant entre 44 et 129 milliards de dollars en 2030 posent un évident problème de réalisme.

Les transferts financiers annuels entre les pays de l'actuelle annexe B et les pays en voie de développement varient entre 28 et 51 milliards de dollars en 2030 dans la règle de Jacoby et de 60 à 98 milliards de dollars dans la règle de convergence. Par comparaison, le total des investissements étrangers dans les pays en voie de développement atteint en 1995 la somme de 90 milliards de dollars. Sans atteindre les sommets observés pour la Russie, ces transferts restent eux aussi particulièrement élevés par rapport aux flux observés aujourd'hui.

Nous sommes donc conduits à nous interroger sur la faisabilité politique d'instruments générant des transferts financiers aussi importants entre l'Ouest et l'Est d'une part, et entre le Nord et le Sud de l'autre. Ce point mérite un examen sérieux car il constitue une limitation pratique très importante pour la mise en place d'un marché de PEN.

f) Des dépenses nettes d'abattement très différenciées

Les figures 8.12 et 8.13 présentent les dépenses d'abattement nettes en 2030. Rappelons que ce chiffre comprend à la fois les coûts techniques de réduction des émissions et les revenus tirés de la vente des permis. Les distributions sont donc différentes de celles données par les figures 8.8 et 8.9 pour lesquelles seuls les échanges étaient pris en compte.

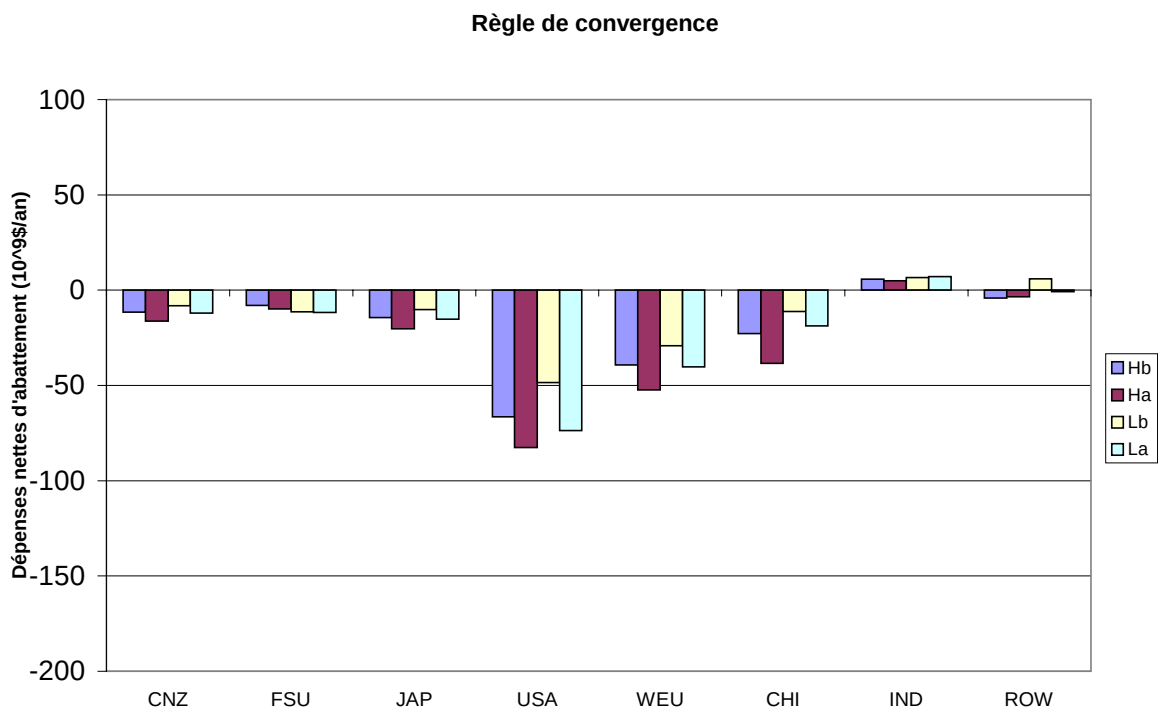


Figure 8.12 : Dépenses régionales nettes de réduction des émissions en 2030 pour la règle de convergence par tête (milliards de dollars par an).

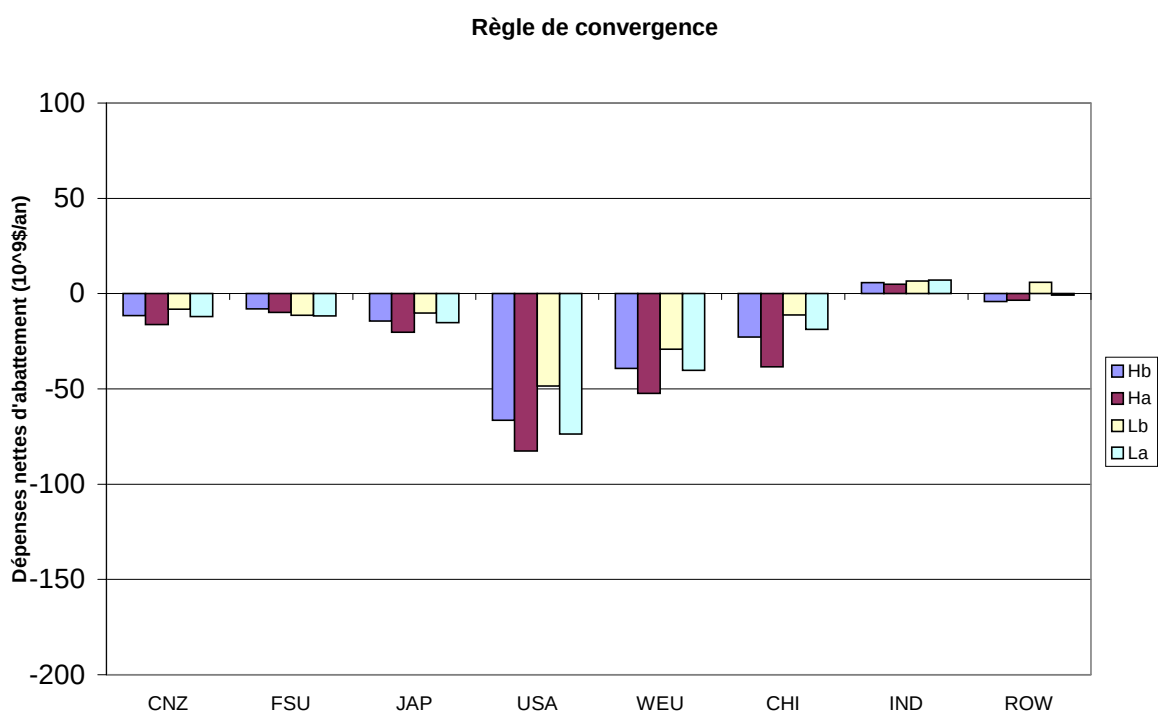


Figure 8.13 : Dépenses régionales nettes de réduction des émissions en 2030 pour la règle de Jacoby (milliards de dollars par an).

Les figures 8.12 et 8.13 montrent que les dépenses nettes de réduction des émissions dépendent fortement des trajectoires de référence. Cette sensibilité apparaît cependant nettement plus faible dans

le cas de la convergence que dans le cas de Jacoby. Dans le premier cas, les coûts varient de 1 à 1,6 alors que dans le second, l'écart est beaucoup plus important (de 1 à 2,6 pour les USA, sans parler de la Chine).

Cette observation peut être précisée. La figure 8.7 montre en effet que dans la règle de Jacoby, les résultats dépendent plus de l'hypothèse sur les taux de croissance que sur l'hypothèse sur les liens émissions – croissance¹⁵. Outre le fait que la règle de Jacoby dépend par construction des niveaux d'abattement, cette sensibilité au taux de croissance provient aussi de fait que les fonctions de coûts augmentent rapidement au-dessus de 30% de pourcentage de réduction des émissions. Or en cas de croissance élevée, les quotas imposés par la règle de Jacoby sont assez sévères, ce qui entraîne des niveaux d'abattement domestique bien supérieurs à 30% et donc des coûts d'abattement très élevés.

3.1.2. Une distribution des coûts d'abattement instable et peu équitable

Comme expliqué en introduction de ce chapitre, notre objectif est d'évaluer la robustesse des différentes fonctions de coûts de réduction des émissions ainsi que l'écart entre la distribution des coûts qui résulte de l'adoption de la règle de convergence ou de la règle de Jacoby et celle qui est donnée par la répartition au prorata du PIB par tête décrite au chapitre 4. Nous résumons ces deux informations au moyen de la représentation graphique suivante. Sur les figures 8.14 et 8.15 ci-dessous, le coût de la politique climatique en 2030 pour chaque région est rapporté au coût que cette région aurait à subir si les coûts mondiaux en 2030 étaient distribués au prorata du PIB par tête.

Si les coûts de réduction des émissions étaient répartis conformément à la règle développée au chapitre 4, alors tous les pays se situeraient sur les figures ci-dessous à l'indice -1 (ligne pointillée). Un indice plus faible, de -2 par exemple, indique que la région considérée contribue deux fois plus au financement de la politique climatique qu'elle ne le « devrait » au prorata de son PIB par tête. Un indice supérieur à -1 indique au contraire que la région considérée contribue moins à la politique climatique qu'elle ne le « devrait ». Un indice positif indique même que la mise en place d'une contrainte climatique entraîne un gain financier pour la région considérée.

Le premier résultat que suggèrent les figures 8.14 et 8.15 est que chacune de ces deux règles conduit à une distribution des coûts de réduction des émissions inéquitable au sens de la règle de distribution des coûts au prorata du PIB par tête retenue au chapitre 4. L'Union Européenne se révèle dans tous les cas assez proche de ce qu'elle devrait payer, mais les USA et la région CNZ dans la règle de convergence, ainsi que les USA, CNZ et la Chine dans la règle de Jacoby paient plus que ce qu'ils « devraient payer ». L'Inde et le reste du monde (ROW) paient par contre nettement moins qu'ils ne « devraient », voir gagnent, du fait de la mise en place de la politique climatique.

Si nous laissons de côté la Chine du fait des difficultés et des incertitudes spécifiques à ce pays, aboutir à un résultat dans lequel des régions fortement émettrices comme CNZ ou les USA paient le plus pourrait à première vue paraître assez naturel. Il faut cependant rappeler que selon la règle d'allocation des coûts au prorata au PIB par tête qui sert ici de référence, chaque Américain devrait déjà payer environ 11 fois plus par tête que chaque Indien à l'horizon 2030. Constaté ici qu'ils paient « deux fois plus qu'ils ne devraient » dans cette distribution de référence revient à supposer qu'ils paieront maintenant 22 fois plus que ne devrait payer chaque Indien. Il n'est certes pas impossible de trouver des moyens de justifier un tel effort, par exemple au nom de la responsabilité passée, mais la redistribution de la richesse impliquée par les politiques climatiques ne manquera pas de poser des problèmes d'acceptabilité dans les pays développés, ce qui pourrait à terme miner l'objectif central de la Convention Cadre sur le Changement Climatique, à savoir la protection du climat.

¹⁵ Rappelons que puisque les émissions de référence sont très différentes dans chacun des scénarios étudiés, les concentrations à long terme varient entre 505 et 575 ppm, ce qui reste une fourchette raisonnablement large.

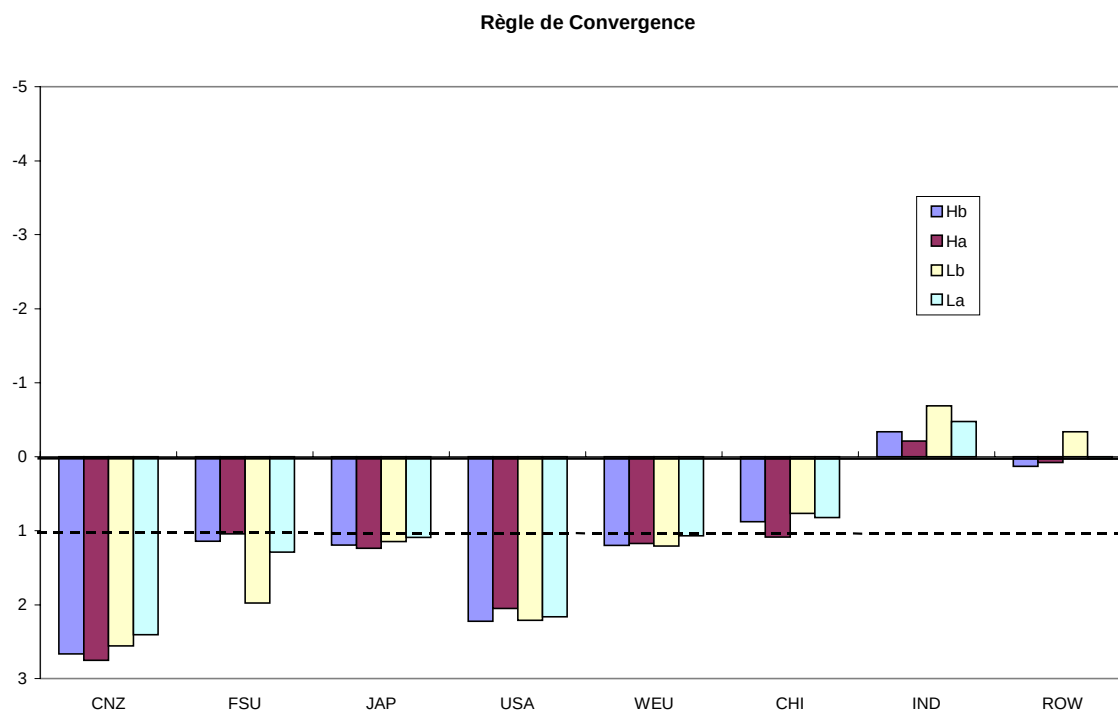


Figure 8.14 : Indice des coûts de réduction des émissions par rapport à la distribution obtenue au chapitre 4 dans le cas de la règle de convergence par tête. A -1 , la région considérée contribue autant qu'elle le « devrait » suivant la règle définie au chapitre 4. Pour un indice inférieur, la région contribue plus : un indice de -2 indiquant qu'elle contribue en volume deux fois plus à la politique climatique qu'elle ne le « devrait » si sa contribution était calculée au prorata du PIB par tête. Un indice strictement positif indique enfin que la région enregistre un gain net suite à la mise en place de la politique climatique.

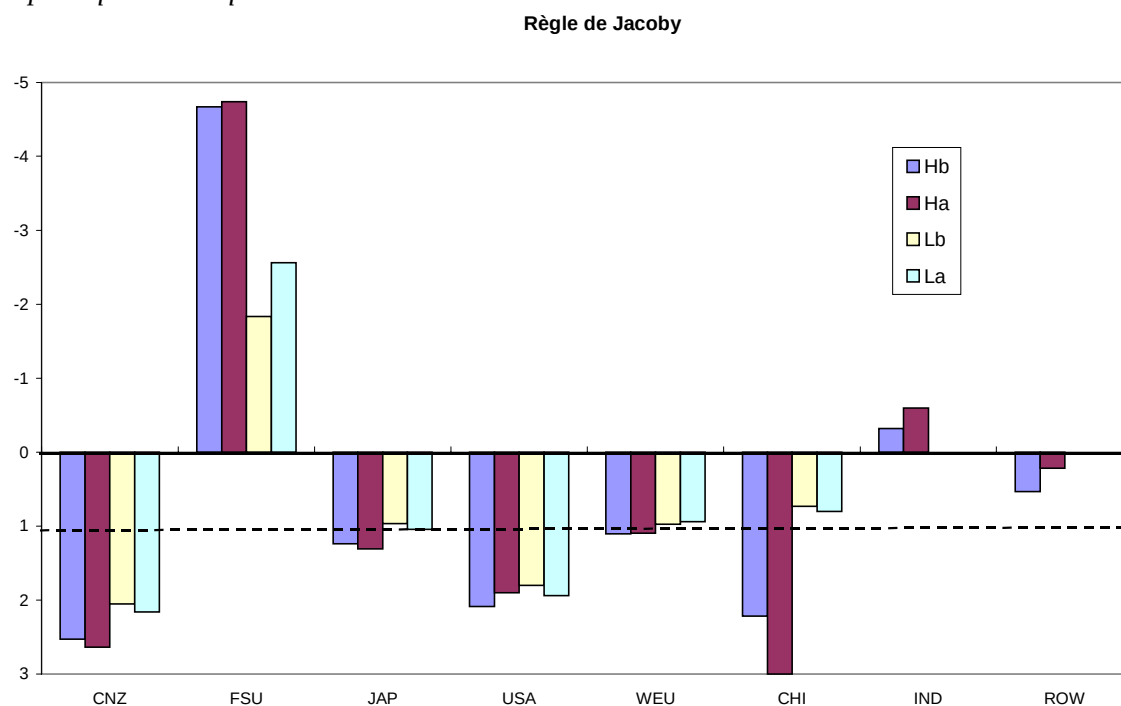


Figure 8.15 : Indice des coûts de réduction des émissions par rapport à la distribution obtenue au chapitre 4 dans le cas de la règle de Jacoby. A -1 , la région considérée contribue autant qu'elle le « devrait » suivant la règle définie au chapitre 4. Pour un indice inférieur, la région contribue plus : un indice de -2 indiquant qu'elle contribue en volume deux fois plus à la politique climatique qu'elle ne le « devrait » si sa contribution était calculée au prorata du PIB par tête. Un indice strictement

positif indique enfin que la région enregistre un gain net suite à la mise en place de la politique climatique.

En termes d'impact de l'incertitude ensuite, nous observons que la règle de convergence par tête apparaît un peu moins sensible à la trajectoire de référence que la règle de Jacoby pour les pays de l'OCDE. La distribution des coûts d'abattement est par contre fortement dépendante des hypothèses pour toutes les autres régions.

- En premier lieu, la FSU voit ses coûts devenir négatifs dans le cas de la règle de Jacoby, et positifs dans le cas contraire. Ce résultat est une conséquence logique de l'asymétrie entre les règles vis-à-vis de cette région que nous avons mise en évidence plus haut : pour cette région dont le PIB par tête est nettement plus faible que dans les autres pays de l'annexe B, la règle de Jacoby se révèle nettement plus favorable que la règle de convergence par tête. Ce groupe de pays devrait donc soutenir sans équivoque l'adoption d'une règle de Jacoby.
- Par contraste, la Chine a tout intérêt à voir adopter la règle de convergence par tête. Si le taux de croissance est faible, la différence n'apparaît pas significative. Si le taux de croissance anticipé est élevé, la règle de Jacoby s'avère en effet particulièrement coûteuse pour cette région. D'une manière symétrique à la FSU, la Chine devrait donc soutenir sans équivoque la règle de convergence par tête.
- Dans le cas de la règle de convergence, l'impact net les régions Inde et reste du monde (ROW) se révèle plus sensible à la trajectoire de référence que dans le cas Jacoby. Cependant, ces régions subissent des coûts nets en 2030 puis des gains nets en 2050 dans tous les scénarios alors que dans le cas de la règle de Jacoby le signe de leurs coûts dépend de leur trajectoire de croissance. Ces coûts deviennent même significativement élevés pour les scénarios de haute croissance.

Ces résultats doivent bien entendu être pris avec beaucoup de précautions. Ils suggèrent néanmoins que ni la règle de convergence ni la règle de Jacoby ne sont suffisamment robustes par rapport au choix de la trajectoire de référence.

3.1.3. Incertitude et composition des coalitions

		CNZ	FSU	JAP	USA	WEU	CHI	IND	ROW
Hb	Convergence	-307	-180	-431	-2296	-1107	-353	190	22
	Jacoby	-281	1257	-434	-2167	-1058	-712	33	-254
Ha	Convergence	-306	45	-422	-1760	-1023	-406	121	128
	Jacoby	-310	1008	-454	-1767	-1053	-1035	84	9
Lb	Convergence	-209	-235	-288	-1523	-757	-194	220	188
	Jacoby	-139	228	-195	-990	-511	-188	18	38
La	Convergence	-265	-100	-376	-2194	-933	-370	265	126
	Jacoby	-177	354	-246	-1322	-621	-324	32	63

Tableau 8.8 : Facture climatique totale actualisée pour chaque région (en milliards de dollars 1990) pour une convergence à 550 ppm selon la trajectoire de référence puis la règle de convergence retenue. Les chiffres en grisé représentent la meilleure règle étant donné le scénario de référence.

Le tableau 8.8 indique pour chaque région la somme actualisée totale en 2000 des coûts d'abattement selon le scénario de référence considéré, puis la règle de convergence retenue. Nous constatons en premier lieu que même si les anticipations sont stabilisées sur un scénario de croissance précis, il n'existe en aucun cas unanimité entre les différentes régions :

- Si le scénario retenu est un scénario à croissance faible, alors tous les pays de l'OCDE, l'ex-URSS et la Chine ont intérêt à adopter la règle de Jacoby. L'Inde et le reste du monde ont au contraire intérêt à voir adopter une règle de convergence.

- Lorsque le scénario retenu est au contraire à croissance élevée, alors la Chine bascule dans le camp des « pro-convergence », la FSU reste favorable à la règle de Jacoby, et la position du Japon, des USA, de CNZ et de l'Europe varie selon les anticipations sur les liens entre croissance et émissions. Pour ces pays, l'écart entre les deux règles reste cependant relativement modeste.

Le tableau 8.8 suggère néanmoins que si le taux de croissance anticipé est élevé, tous les pays sauf l'ex-URSS ont intérêt à voir se mettre en place la règle de convergence, alors que si le taux de croissance anticipé est faible, la règle de Jacoby aura les faveurs d'un ensemble large comprenant l'OCDE, l'ex-URSS et la Chine.

Si nous regardons maintenant le tableau en colonnes, nous constatons que la FSU est clairement favorable à une règle de Jacoby, conformément à la discussion sur le « *hot air* » que nous avons menée au-dessus. Les USA et CNZ se rapprochent aussi d'une telle position, même si leurs choix s'inversent légèrement dans le scénario Ha. L'Europe est dans le même cas, mais avec une inversion plus importante, tout comme le Japon qui a intérêt à voir la convergence se mettre en place si le taux de croissance est élevé. L'Inde et le reste du monde sont au contraire toujours favorables à une trajectoire de convergence. Entre les deux, la Chine possède une position très intéressante dans la mesure où elle peut toujours, en invoquant le scénario futur adéquat, s'opposer au choix de la règle de Jacoby ou de la règle de convergence.

Supposons maintenant que la négociation porte sur le choix d'une règle d'allocation des quotas entre convergence par tête et règle de Jacoby. Que pouvons-nous conclure du tableau 8.8 en termes de marges de manœuvre stratégiques pour les différentes Parties en présence ? Nous avons vu que l'Inde et ROW d'une part, et la FSU d'autre part ont des intérêts très clairs dans la négociation. Leur choix est en effet indépendant du scénario de référence. Le choix de la Chine et le Japon dépend par contre entièrement du scénario de référence retenu. Ces considérations permettent alors d'ébaucher le scénario stratégique suivant :

- Pour maximiser les chances que le choix collectif s'oriente vers la règle de convergence par tête, avec laquelle ils sont gagnants, les pays du Sud ont intérêt à afficher des taux de croissance élevés et à « promouvoir » un scénario de haute croissance général en espérant voir alors la Chine et le Japon basculer dans leur camp, et les pays de l'OCDE sans véritable choix décisif. Les coalitions pourraient être alors constituées de (CHI, IND, ROW, JAP) pro-convergence, (FSU) pro-Jacoby et (USA, CNZ, WEU) relativement indifférents à la décision.
- La stratégie de la Russie, qui a un intérêt évident à la règle de Jacoby, sera au contraire de mettre en avant des perspectives de croissance plus mesurées afin de faire basculer la Chine et le Japon dans son camp, de rallier l'OCDE, et de ne conserver comme adversaire dans la négociation que le G-77 moins la Chine. Les coalitions pourraient être alors constituées de (IND, ROW) pro-convergence, (FSU, WEU, USA, JAP, CHI, CNZ) pro-Jacoby.

Sans nous avancer ici sur les conséquences possibles de telle ou telle configuration de négociation, constatons simplement que la nature du scénario de croissance sur lequel les accords se coordonneront change fortement la nature des forces en présence et a de bonnes chances de modifier la nature de la décision finale. L'accord préalable sur un scénario de croissance est donc un élément décisif du jeu, qui ouvre des marges de manœuvre stratégiques très importantes pour certains pays (Allais, 1953).

Conclusion

Ces premiers résultats sont bien entendu largement préliminaires. Le modèle STARTS R demanderait en effet à être amélioré sur la base d'un découpage géographique et temporel plus fin, d'une meilleure prise en compte des comportements anticipateurs des agents et de courbes de coûts d'abattement

régionales de meilleure qualité. Ils permettent néanmoins de mettre en évidence les menaces qui pèsent sur la négociation relative à l'élargissement de l'annexe B aux pays en voie de développement.

- En premier lieu, les deux règles d'allocation des quotas d'émissions que nous avons étudiées mènent à des distributions des coûts d'abattement qui se révèlent fort éloignées de la distribution des coûts au prorata du PIB par tête que nous avons obtenue au chapitre 4. Cette référence n'a bien entendu rien d'absolu, mais nous pouvons cependant craindre que tout partage de la charge qui en serait trop éloigné soit considéré comme inéquitable par ceux qui paieraient le plus. Nos travaux demandent néanmoins à être complétés par l'analyse d'autres règles.
- En second lieu, le comportement du marché de permis d'émissions négociables s'avère fortement dépendant de la trajectoire de référence retenue. Le prix des permis, tout comme la distribution des gagnants et des perdants, dépend en effet de la croyance en un taux de croissance élevé ou faible et, dans une moindre mesure, sur les anticipations quant au lien entre émissions et croissance. Dans ce contexte, le fait de tester plus de règles a toutes les chances d'augmenter encore le nombre de pays pour qui, comme la Chine dans nos simulations, la décision dépend de l'anticipation sur le scénario de croissance.

Rappelons ici que le problème ne provient pas du commerce international des permis d'émissions négociables, mais de la logique même d'une coordination par les quantités. Sans marché des permis, aucune règle n'est robuste, et les coûts d'une mauvaise allocation initiale des quotas seront d'autant plus réduits que des mécanismes de marché sont mis en place. Le marché des permis d'émissions négociables peut donc contribuer à l'équité des politiques climatiques, au moins si les principes, règles et procédures qui le gouvernent sont suffisamment transparentes et justes pour éviter le pouvoir de marché. Cependant, nos simulations montrent que si le marché des permis d'émissions négociables permet de faciliter la mise en œuvre de la coordination par les quotas, il n'est pas suffisant pour éliminer à lui tout seul toutes les sources de tensions.

A long terme, c'est-à-dire pour les périodes budgétaires au-delà de 2012, ces résultats militent donc pour basculer d'une coordination par les quantités à une coordination par les prix. Cette position est défendue depuis longtemps au CIRED (Godard et Hourcade, 1991, Hourcade, 1994) et rassemble depuis peu une majorité d'économistes travaillant sur le changement climatique. Cependant, après avoir abondamment rappelé l'importance des incertitudes sur le scénario de référence et sur les coûts d'abattement, il nous faut nous interroger sur le fait de savoir dans quelle mesure nos résultats eux-mêmes sont susceptibles d'être remis en cause par l'importance de ces controverses. C'est ce à quoi nous nous employons dans le prochain chapitre.

Chapitre 9 Irréductibilité des incertitudes et modes de coordination

Les résultats que nous avons obtenus au chapitre précédent tendent à souligner les difficultés de négocier les règles d'élargissement de l'annexe B face aux incertitudes très importantes tant sur l'évolution de la croissance économique que des coûts d'abattement. Les deux règles que nous avons testées mènent en effet à des distributions des coûts fortement susceptibles d'être qualifiées d'inévitables par l'une ou l'autre des parties. En outre, ces distributions se révèlent fortement dépendantes du scénario de croissance retenu. De même, nous avons obtenu aux chapitres 3 et 6 des résultats quantitatifs importants sur la nature du « timing » de l'action en les risques importants qu'il y aurait à retarder l'action face au changement climatique au-delà de 2020, du fait précisément des risques de « surprise » climatique défavorable.

Mais si elle est à l'origine de ces résultats, l'incertitude ne risque-t-elle pas en même temps d'en causer la perte ? Nous avons en effet souligné au début de cette partie les risques de disqualification de tout discours économique devant l'importance des incertitudes. Nous ne pouvons éviter que cette question se pose maintenant à nos propres travaux. Pour y répondre, nous nous proposons d'abandonner pour un temps le cadre des modèles STARTS, pour nous interroger de manière plus générale sur le statut des modèles économiques en univers controversé. Sans prétendre répondre de manière définitive à cette question difficile, nous tirerons de ces réflexions les éléments nécessaires à l'évaluation des résultats présentés dans cette thèse.

Nous partirons de l'observation suivante : en pratique, la demande sociale vis-à-vis des modèles économiques de long terme est particulièrement ambivalente, et oscille entre une demande pressante pour toujours plus de chiffres et de précisions, et un rejet virulent de ces mêmes outils au motif qu'ils donnent des résultats contradictoires. Derrière ces deux attitudes se dissimule en réalité la même idée implicite selon laquelle un modèle économique de long terme devrait être capable de répondre entièrement au problème climatique. Nous nous proposons dans une première partie d'aller au bout de cette logique en montrant que, si les modèles permettent certes d'aider à cerner l'incertitude, ils ne peuvent en aucun cas la réduire.

Nous reviendrons ensuite sur le fait, entrevu à la fin du chapitre 6, et confirmé au chapitre 8, que la question préalable à la décision en matière climatique n'est plus d'articuler des préférences individuelles pour décider, mais de coordonner différentes visions du monde en compétition¹. Sauf à anticiper des progrès très importants en matière de modèles de prospective, le calcul économique ne peut ici servir de juge de paix, puisque ses paramètres et *a fortiori* ses résultats dépendent eux-mêmes du choix d'une « vision du futur » traduite par des croyances, des choix politiques ou des jugements de valeur. Nous verrons qu'il reste par contre un « langage de négociation » capable de traquer les cohérences ou les incohérences des différents discours sur le futur, et de révéler le détail des différentes « visions du futur » sous-jacentes qui s'affrontent.

Reconnaître ce rôle n'est néanmoins pas suffisant. Il subsiste en effet la question centrale de savoir sur quelle base, finalement, choisir une politique climatique. Le risque existe de recourir exclusivement au scientifique, qui serait alors considéré comme le seul capable de parler au nom de l'intérêt général, alors même que la connaissance nécessaire à la décision n'est pas disponible. En appeler à l'éthique ne constitue pas non plus une solution, dans la mesure où il n'existe pas de théorie éthique qui

¹ Notons que ce glissement se trouve déjà en germe dans l'analyse que nous avons menée au chapitre 4. Nous sommes en effet partis d'une analyse parfaitement classique de la coordination des préférences individuelles *via* le schéma de Bowen, Lindhal et Samuelson. Mais nous avons obtenu le résultat selon lequel la distribution n'était acceptable que dans la mesure où les taux d'actualisation régionaux étaient coordonnés, ce qui revient à une coordination *ex ante* sur le scénario de référence.

s'imposerait de manière indubitable à tous les acteurs. Bien loin de l'ambition des premiers économistes ingénieurs, ou de « l'Anti-Hasard » imaginé par leurs successeurs (Massé, 1965) nous aboutirons finalement à une vision dans laquelle la capacité des modèles économiques de long terme à hiérarchiser l'incertitude en triant celles qui comptent vraiment pour la décision de court terme constitue une première réponse, partielle certes, mais qui a le mérite d'être opérationnelle, pour « introduire un peu de rationalité dans le débat ». A l'aune de ces considérations, nous pourrions enfin évaluer nos propres résultats².

1. L'impossibilité logique de la prévision à long terme

En novembre 1997, au moment de la négociation du protocole de Kyoto, le quotidien *Le Monde* a consacré une série d'encarts sur le changement climatique. Le premier article de cette série, consacré aux impacts possibles de l'effet de serre, était agrémenté de trois cartes du monde présentant pour la première les changements de précipitations possibles à l'horizon 2100, pour la seconde les variations de température, et pour la troisième les risques d'élévation du niveau de la mer pour un scénario d'émissions présenté comme moyen. Or malgré les incertitudes très importantes pesant sur les résultats en question, aucune barre d'erreur ou indication d'incertitude n'était mentionnée. Pour le lecteur pressé ou simplement peu intéressé par le sujet, il était difficile de ne pas faire le lien avec le bulletin météorologique de tous les jours. Voici donc le temps qu'il fera sur la planète à l'horizon d'un siècle ! Le choix d'une telle illustration n'est pas fortuit. Il est au contraire symptomatique d'une confiance pour le moins excessive en les capacités des modèles intégrés à prévoir ce que sera effectivement le futur.

L'attitude opposée est tout aussi, sinon plus, fréquente. Dans un éditorial publié très récemment dans le même journal et consacré à l'avenir du système de retraites en France, Alain Lebaube commence par renvoyer dos à dos les deux rapports qui viennent d'être publiés sur la question : « *Compte tenu des perspectives économiques et démographiques des quarante prochaines années, Jean-Michel Charpin, prudent, conclut à la nécessité de porter la durée de cotisation des salariés français à 42,5 ans [...]. Euphorique, le second [auteur], René Teulade, retient l'hypothèse que la France connaîtra au cours des quarante prochaines années une croissance de 3,5 % [...] et que, donc, il ne serait pas nécessaire de changer notre système de retraites. On peut s'interroger sur le bien-fondé d'un débat qui se limite à une querelle de chiffres. Faut-il que des extrapolations macroéconomiques viennent trancher un sujet de société ? La question des retraites ne saurait aujourd'hui se réduire à une polémique entre prévisions actuarielles divergentes, comme le disent les assureurs pour évaluer une prime en fonction du risque* ». Nous voici au contraire dans l'univers de la critique envers les modèles au motif du fait qu'ils fournissent une réponse prédéterminée par les hypothèses d'entrée (« *Garbage in – Garbage out* »).

Il pourra paraître surprenant de mettre ainsi en parallèle deux attitudes qu'en apparence tout oppose. Il nous semble néanmoins qu'elles participent toutes les deux de la même illusion, à savoir que les modèles économiques de long terme seraient capables de dire quelles devraient être les bonnes décisions à prendre relativement aux problèmes de long terme. Si en effet cette illusion n'était pas partagée aussi par les seconds, alors pourquoi s'offusqueraient-ils du fait que les modèles économiques ne donnent pas tous les mêmes résultats ? Si les modèles doivent au contraire dire le vrai, ou tout du moins s'il est possible de construire un « modèle parfait » qui dirait le vrai, alors cette réaction de rejet est au contraire logique. Si nous acceptons ces prémisses en effet, les modèles existants ne peuvent donner des résultats différents que pour deux raisons : soit ils sont manipulés par leurs auteurs, qui ne sont plus de « vrais » scientifiques impartiaux, soit ils souffrent de l'absence des moyens financiers et humains nécessaires pour construire « le » modèle. Dans ces deux cas de figure, ils sont à rejeter parce qu'imparfaits. Plus profondément, si le modèle doit dire le vrai, alors le futur est écrit, et il ne subsiste plus aucun espace pour exercer la liberté humaine. Comment ne pas rejeter un

² Nous remercions Philippe Ambrosi pour ses commentaires sur ce chapitre.

projet au mieux aussi pessimiste, au pire aussi totalitaire ? Lorsque Alain Lebaube oppose les froides « *extrapolations économiques* » à la richesse d'un « *sujet de société* » tel que les retraites, c'est bien cette crainte que nous pouvons lire en filigrane.

Il revient à l'épistémologue, au sociologue, au psychologue et à l'historien de démêler les raisons pour lesquelles l'illusion selon laquelle les modèles ont ou peuvent avoir réponse à tout est si répandue. Nous en tirons simplement la conclusion qu'elle n'est pas si évidente que cela à réfuter. Nous nous proposons donc dans cette première section d'aller au bout de la logique d'un modèle comme outil capable de dire le vrai. Nous commencerons par montrer que cette représentation est en partie valide pour les modèles économiques de court terme. Nous montrerons par contre que tel n'est plus le cas à long terme.

1.1. A court terme : possibilité d'une démarche « expérimentale »

Commençons par définir le vocabulaire. Nous appelons modèle économique tout système d'équations dont toutes ou partie des variables peuvent être interprétées comme des grandeurs économiques observables (PIB, population, niveau des prix ou des revenus par exemple). Nous dirons que le modèle est « de long terme » lorsqu'une partie de ces variables représente des grandeurs économiques à grande distance dans le futur. Il est de court terme si la condition précédente n'est pas remplie.

Dans le cas de l'effet de serre, nous avons vu qu'un horizon de l'ordre du siècle était nécessaire pour intégrer les impacts du changement climatique. Nous reviendrons dans la suite sur la limite précise entre « court terme » et « long terme » pour les modèles. En second lieu, la définition qui précède n'exclut pas les modèles d'évaluation intégrée des politiques climatiques, qui comprennent des modules économiques, mais aussi climatiques et biologiques. Nous nous consacrons néanmoins ici principalement aux questions économiques.

Venons-en maintenant aux modèles économiques de court terme. De nombreux modèles économiques fournissent aujourd'hui des informations sur l'état potentiel de l'économie dans un proche avenir (de quelques mois à cinq ans environ) et sur les conséquences qu'aurait à cet horizon l'adoption de telle ou telle politique. Il s'agit par exemple en France des modèles de l'INSEE qui jouent le rôle de véritables « bancs d'essai » des politiques publiques.

L'objectif assigné à ces modèles est de donner l'image la plus juste possible de ce que sera l'économie à l'horizon considéré. De nombreuses difficultés tenant à la précision des données, à la quantité et à la finesse des processus économiques pris en compte et au bouclage des mécanismes économiques entre eux rendent difficile d'exiger une véritable prévision au sens où l'entendent les météorologues lorsqu'ils donnent le temps du lendemain. Selon l'expression de Jean-Michel Jeanneney (1989), ces modèles doivent plutôt fournir, hors événement imprévisible, une bonne perspective sur l'état de l'économie future.

Le point important est qu'il est possible, au moins conceptuellement d'améliorer ces modèles de court terme en comparant *ex post* leurs prévisions avec les grandeurs économiques effectivement observées (Jeanneney, 1989, Guillaume, 1971). Nous pouvons qualifier cette démarche d'expérimentale, même s'il s'agit à proprement parler d'un abus de langage. Bien entendu, cette procédure par essais et erreurs successives n'est pas facile à mener³ et coûteuse en temps et en argent. Mais le point important est qu'elle est conceptuellement possible, et qu'elle fournit ainsi un mécanisme « simple » pour améliorer la qualité des modèles économiques de court terme.

³ Elle suppose d'être capable de comprendre l'origine des écarts entre le modèle et la réalité économique qu'il est sensé représenter. Ce travail est néanmoins facilité par le fait qu'il est possible de considérer qu'à court terme les structures productives de l'économie, ainsi que les technologies et les comportements, ne sont pas fondamentalement modifiés (Boyer et Juillard, 1991).

Mais cette explication est insuffisante. Pour le voir, nous détournons ici une citation de Michael Grubb qui, en conclusion d'une revue des modèles économiques sur le changement climatique de 1993, fait le commentaire suivant : « *I'm still not sure how far I believe the numbers - yet. But all the [greenhouse policy analysis] models yield useful information, and they are moving steadily close to reality* » (p.208). Bien entendu, cet auteur ne saurait être suspecté de sous-estimer les énormes incertitudes qui pèsent sur la décision. Mais l'expression, malheureuse, qu'il emploie nous fournit une clé pour mieux comprendre les arguments qui pourraient appuyer l'idée selon laquelle, même à long terme, les modèles pourraient être des outils de prévision :

- Nous devons bien entendu éliminer l'interprétation triviale selon laquelle la « réalité » à laquelle il fait allusion serait « l'état futur de l'économie ». La proposition « *and they are moving steadily close to reality* » serait en effet tout bonnement indécidable.
- Mais une interprétation plus subtile peut être trouvée : il suffit de considérer que le « rapprochement » en question concerne la structure du modèle et la manière dont la théorie économique représente les dynamiques de croissance. L'argument se alors présente sous la forme suivante : plus la structure du modèle représente correctement dynamique de l'économie, plus les résultats numériques du modèle sont proches de ce qui se devrait se passer en réalité.

Ainsi reformulé, l'expression utilisée par Michael Grubb, et avec elle l'idée que les modèles pourraient prévoir le monde futur, apparaît tout à coup beaucoup plus sensée. D'une certaine manière, nous trouvons énoncé ici une forme affaiblie du critère expérimental que nous avons vu plus haut pour les modèles économiques de court terme. Nous allons cependant nous employer ici à montrer que nos connaissances sur les dynamiques économiques nous conduisent à réfuter cette représentation.

1.2. A long terme : limite des connaissances et irréductible « effet papillon »

L'idée selon laquelle une fois formulées les hypothèses nécessaires sur les paramètres incertains, le modèle fournirait une prévision relativement fidèle de l'état du monde futur soulève deux questions importantes sur les dynamiques économiques. La première revoie à l'état actuel de nos connaissances. En savons-nous assez aujourd'hui pour dire, étant donnés les comportements des agents et leur environnement technologique en particulier, quelles sont les dynamiques économiques les plus importantes à moyen et long terme ?

En second lieu, supposer que si nous connaissons et nous représentons correctement la dynamique, alors l'état final du modèle sera proche de l'état effectif de l'économie future revient à formuler l'hypothèse selon laquelle la dynamique des systèmes économiques est « essentiellement continue », c'est-à-dire qu'une bonne connaissance du point de départ et des « lois du mouvement » permettent aussi de bien connaître le point d'arrivée. Que peut-on dire de cette hypothèse au regard de la théorie économique actuelle ? Nous examinons successivement ces deux interrogations.

1.2.1. Des connaissances encore parcellaires en matière de dynamique économique

La première question renvoie à l'état des connaissances de la théorie sur les mécanismes d'évolution des systèmes économiques. La littérature nous apprend qu'il existe des mécanismes considérés comme « indubitables ». Il s'agit par exemple de la dynamique d'accumulation du capital, et plus généralement de toute relation de nature essentiellement physique reliant l'état de l'économie à deux dates différentes (Ramsey, 1928, Solow, 1956). Sans prétendre ici proposer un tableau exhaustif des forces et des faiblesses de la théorie de la croissance, notons simplement que nous avons rencontré dans cette thèse deux éléments, importants pour l'évaluation des dynamiques économiques, pour lesquels subsistent de très importantes controverses.

- En premier lieu, le diagnostic sur le point de départ, c'est-à-dire sur l'état actuel de notre société est loin de faire l'unanimité. Les débats sur l'ampleur des potentiels sans regret ou sur l'importance du double dividende économique des politiques climatiques évoqués en introduction confirment la difficulté qu'il y a à évaluer la position de l'état actuel de notre économie par rapport à une frontière de production potentielle, ou par rapport à une organisation optimale du système fiscal.
- En second lieu, nous avons souligné au chapitre 6 que la représentation d'un progrès technique autonome restait incapable de représenter les mécanismes d'accumulation de connaissances et d'investissement en recherche et développement qui sont pourtant décisifs pour la croissance. La théorie de la croissance endogène constitue une première tentative de réponse à ces questions, mais les réponses qu'elle apporte sont encore partielles (Aghion et Howitt, 1998).

La liste des « vides de la connaissance » relatifs à la théorie de la croissance, pour reprendre l'expression d'Hadi Dowlatabadi, ne s'arrête bien entendu pas là. Ces deux éléments suffisent cependant pour confirmer l'intuition que le lecteur aura pu avoir dès le départ, à savoir que la science économique ne sait aujourd'hui correctement ni identifier ni représenter les mécanismes déterminants pour l'économie à très long terme.

1.2.2. Une irréductible non-continuité

Même si nous levions l'hypothèque précédente, par exemple en supposant de futurs progrès majeurs de la science économique, nos projections futures seraient-elles nécessairement plus fiables ? Répondre par l'affirmative à cette question revient à formuler l'hypothèse suivante : plus l'état passé et présent de l'économie ainsi que les dynamiques qui gouvernent son évolution sont représentés avec précision, plus les résultats du modèle se rapprochent de ce que sera effectivement l'état futur de l'économie. Une image tirée de l'artillerie nous servira à illustrer cette hypothèse de continuité des dynamiques économiques. La mécanique nous enseigne en effet que si nous connaissons précisément la position d'un canon, son angle de visée et la vitesse initiale de son projectile (c'est-à-dire les conditions passées et présentes de l'économie), et si nous approchons avec de plus en plus de précision la valeur de la constante de gravitation, alors nous déterminons du même coup avec une précision de plus en plus grande le point d'arrivée du boulet⁴.

Cependant, nous avons vu au chapitre 6 que la théorie nous incite à mettre en cause cette représentation « balistique » des dynamiques économiques (dont nous sommes partis au chapitre 1). Des mécanismes de rendements croissants ont ainsi été mis en évidence dans de nombreux domaines de l'économie : les rendements d'échelle croissants pour les entreprises, les mécanismes de « *learning by doing* » (Arrow, 1962), les phénomènes de bulles spéculatives sur les marchés financiers (Azariadis et Guesnerie, 1986) ou encore la polarisation géographique des activités autour de certains sites (Krugman, 1993) en constituent autant d'exemples. Or d'un point de vue mathématique, un système dynamique comportant de telles boucles de rétroaction positives présente en général une forte instabilité se caractérisant par deux propriétés importantes : d'une part deux points de départ très proches peuvent partir des trajectoires très fortement divergentes, et d'autre part une petite variation des paramètres du modèle est susceptible d'induire des changements radicaux de la forme de ces trajectoires.

Il ne s'agit pas là semble-t-il d'un simple artefact mathématique : cette grande sensibilité des trajectoires reflète des propriétés réelles du système économique. C'est ce qui se produit par exemple dans les phases de compétition entre technologies émergentes, dont il est *a priori* difficile de prévoir l'issue (Arthur, 1989). En ces points, la compréhension de ce qui détermine le choix de telle trajectoire plutôt que de telle autre reste délicate. On sait que ces bifurcations peuvent s'opérer aussi bien sous la pression de l'histoire qu'à cause d'anticipations sur le futur (Krugman, 1991), mais leurs déterminants

⁴ Des effets de second rang comme la vitesse du vent ou la résistance de l'air interviennent, mais ils restent négligeables au premier ordre, et peuvent par ailleurs être eux-aussi modélisés.

au cas par cas sont très mal connus. Les analyses *ex post* montrent que ces déterminants sont souvent des éléments contingents (i.e. de l'ordre de ce que nous avons appelé les perturbations extérieures au système économique) ou des signaux économiques très faibles qu'il est très difficile d'anticiper. Les dynamiques économiques sont ainsi essentiellement non linéaires. Les arguments précédents découlent certes d'analyses sectorielles, mais nous ne connaissons pas de raison pour supposer que de l'agrégation de ces différentes dynamiques non linéaires résulterait une trajectoire globale qui serait, elle, essentiellement continue. Comme en météorologie, la nature même des dynamiques économiques empêche toute prévision à long terme.

2. Le modèle pour cerner l'incertitude

Le résultat qui vient d'être énoncé est purement négatif. Il ne nous renseigne en effet en rien sur la nature des informations que nous pouvons tirer de l'usage des modèles économiques de long terme. Il crée plutôt un vide qu'il s'agit d'essayer combler. Pour ce faire, il est utile de revenir à la nature première des modèles économiques de long terme, à savoir des outils capables d'intégrer et d'articuler de grandes quantités de connaissances. A ce titre, nous allons le voir, les modèles sont eux-mêmes en outils de connaissance qui permettent sinon de réduire, du moins de cerner les incertitudes qui pèsent sur la décision en matière climatique.

2.1. Des machines à agréger et à traiter les données

Les différents modèles économiques de long terme⁵ présentent tout d'abord l'intérêt d'agréger de très nombreuses données. Cette propriété est d'abord quantitative, comme l'illustrent les grands modèles « *bottom-up* » fondés sur des bases de données technico-économiques très détaillées ou les principaux modèles « *top-down* » qui utilisent des séries économétriques très longues. Mais elle est aussi qualitative. Un modèle numérique aussi « simple » que DICE (Nordhaus, 1992a et b) rassemble en réalité des données tant sur les mécanismes de la croissance agrégée, que sur les préférences des agents ou les coûts de réduction des émissions de gaz à effet de serre. Il croise en outre ces informations avec une représentation des dynamiques d'accumulation du CO₂ dans l'atmosphère et une représentation des impacts. Nous avons d'ailleurs suivi la même démarche dans le premier chapitre de cette thèse en construisant le modèle STARTS, d'abord pour articuler en un outil unique des informations très différentes.

Au-delà du fait que les données soient relatives à des secteurs de l'activité économique ou à des disciplines scientifiques différentes, les modèles économiques permettent aussi de rassembler des énoncés dont les statuts logiques sont différents. L'exemple de DICE est ce titre éclairant : les données initiales d'émissions ou de production pour les années 70 et 80 qui définissent le point de départ du calcul sont des mesures, le taux de croissance à long terme, tout comme la forme de la fonction de production, résulte du choix d'un scénario pour la trajectoire économique future, les coûts d'abattement proviennent de dires d'experts, le choix d'une fonction d'utilité collective intertemporelle relève du jugement de valeur, et les dommages du changement climatique sont enfin des extrapolations fondées sur un raisonnement économétrique. La grande force de ces outils est ainsi de pouvoir mettre en cohérence les informations très disparates dont nous disposons sur l'avenir, et de pouvoir construire sur cette base une image du futur.

L'intégration de données se heurte cependant à une limite importante. Un modèle économique n'intègre en effet que ce qu'il peut intégrer, à savoir des informations qui peuvent, peu ou prou être traduites sous la forme de chiffres ou d'équations. Un grand nombre d'énoncés pourtant considérés comme valides, par exemple sur la nature des institutions, ou l'évolution des comportements, se

⁵ Dont le lecteur pourra trouver un bon aperçu dans le chapitre dirigé par John Weyant dans le second rapport du GIEC (1996).

révèlent réfractaires à cette traduction, sauf par des moyens détournés et peu satisfaisants. Derrière ce constat se dissimule un débat très vif sur la supposée prééminence des modèles économiques, et pas uniquement de long terme, dans l'analyse des phénomènes économiques. Nous nous ne nous engagerons pas dans cette controverse très complexe, et nous nous bornerons à constater ici que (i) les modèles ne peuvent proposer qu'une représentation partielle des phénomènes économiques, (ii) que cette représentation essentiellement logistique, pour reprendre l'expression d'Amartya Sen, est nécessaire à l'analyse, mais (iii) qu'elle n'est en aucune manière suffisante.

Outre l'agrégation des données, les modèles économiques de long terme présentent aussi l'avantage de permettre des traitements très complexes sur ces données. Le langage mathématique permet en effet de rendre compte de raisonnements économiques complexes et constitue ainsi un outil privilégié pour examiner des chaînes causales longues ou des raisonnements en boucle (Arrow, 1951, Guesnerie, 1989). L'apparition d'outils de calcul numérique de plus en plus puissants permet d'automatiser ces tâches, et de multiplier la précision et l'ampleur des modèles. Pour rendre plus concret le saut qualitatif ainsi effectué, notons que la première version du modèle STARTS, développée sur un logiciel ancien, nécessitait une demi-heure de calcul pour obtenir une optimisation intertemporelle. Quatre ans plus tard, son petit frère STARTS 2 comporte huit fois plus de variables et converge en environ deux minutes. Le développement des outils informatiques offre en outre une palette d'outils particulièrement puissants pour présenter les résultats de ces simulations.

2.2. Vers une première délimitation de champ des incertitudes

Rappelons tout d'abord brièvement la nature des différentes incertitudes qui pèsent sur la décision en matière climatique. Pour résumer, nous pouvons les ranger en trois grandes catégories :

- Incertitudes sur les dommages du changement climatique : cette incertitude résume l'ensemble des controverses qui entourent la chaîne émissions de gaz à effet de serre – concentrations – impacts sur le climat et les écosystèmes – dommages sur les économies. Si le montant de ces dommages et leurs distributions géographiques sont les grandeurs les plus couramment discutées, le chapitre 3 nous a montré que la forme de la fonction dommage, et en particulier la présence de non-linéarités, était tout aussi critique pour la décision.
- Incertitudes sur le scénario économique de référence : cette incertitude recouvre à la fois les paramètres macroéconomiques de la croissance à long terme (taux de croissance par exemple), mais aussi la nature des technologies à long terme ou les coûts d'abatement. Nous avons vu que le poids des paramètres non observables (progrès technique induit, potentiels sans regret, double dividende) était prépondérant pour la détermination de ces coûts.
- Incertitudes sur les comportements : la nature des comportements futurs vis-à-vis de l'environnement en général et de l'effet de serre en particulier est par nature impossible à prévoir. Nous avons pourtant vu au chapitre 6 que, du fait que les politiques climatiques s'étendent sur le très long terme, nous ne pouvons faire autrement que porter un jugement sur le comportement des générations futures pour fixer nos propres objectifs.

En tant que machines à agréger, à traiter et à synthétiser de l'information, les modèles économiques de long terme permettent d'explorer le futur et de réduire pour partie au moins les incertitudes. Deux exemples nous permettront de nous en convaincre. Dans le domaine climatique en premier lieu, la hausse de la température consécutive à un doublement de la concentration atmosphérique en CO₂ dans l'atmosphère par rapport au niveau préindustriel est ainsi estimé entre 0,5 et 3,5°C par le second rapport du GIEC. Une multiplication irréfléchie des marges d'incertitudes pesant sur les différents paramètres des modèles climatiques aurait certainement débouché sur une barre d'erreur beaucoup plus grande. En l'occurrence, le fait d'utiliser un raisonnement du type « équilibre général » permet de limiter l'incertitude finale.

Dans le domaine économique, nous avons déjà rencontré dans l'introduction la fourchette des principales estimations des prix des PEN à l'horizon 2010 rassemblées par l'OCDE (en supposant l'application du protocole de Kyoto et la mise en place d'un marché entre tous les pays de l'annexe B, Van der Mensbrugghe, 1998). Ce prix s'échelonne selon les modèles entre 20\$ et 123\$ (en dollars 1995). Une telle fourchette autorise une double lecture. Soit, comme nous l'avons fait en introduction, nous voyons le verre à moitié vide et nous relevons que l'écart des prix varie de 1 à 6. Soit nous voyons le verre à moitié plein, et nous relevons que ni un prix très faible, de 5\$ par exemple, ni un prix très élevé, disons 200\$, ne font partie de la fourchette. Ceci ne signifie certes pas qu'ils ne se réaliseront pas, mais nous indique tout de même qu'au regard de la connaissance actuelle, ils sont supposés avoir une chance plus faible de se produire.

2.3. Mais il reste nécessaire de faire face à l'incertitude

Les modèles économiques se révèlent ainsi des outils performants pour agréger une grande quantité d'informations. Ils permettent en effet de mieux cerner l'incertitude qui pèse sur les décisions que nous avons à prendre concernant les problèmes de long terme comme le changement climatique. Il nous faut néanmoins nous garder de retomber ici dans l'idée erronée selon laquelle les modèles permettraient d'apporter une solution définitive au problème de décision en matière climatique. Rappelons à nouveau ici les deux éléments qui viennent contredire cette idée.

- D'une part, nous avons constaté durant toute cette thèse que les résultats des modèles restent fortement dépendants de l'incertitude sur les coûts d'abatement, sur les dommages du changement climatique ou sur la trajectoire économique de référence. La double lecture des évaluations des prix des permis pour 2010 que nous avons proposée au début de cette section en témoigne : le travail de modélisation permet de cerner l'incertitude, mais il subsiste encore une fourchette assez large.
- D'autre part, les dynamiques économiques elles-mêmes semblent être essentiellement non continues. Les mécanismes cumulatifs, qui se révèlent dès lors que nous nous intéressons aux systèmes techniques, institutionnels et géographiques sur lesquels se fondent la croissance, entraînent en effet la présence d'équilibres multiples. Or le choix entre ces équilibres procède de déterminants qui sont imprévisibles *ex ante*. La présence de semblables bifurcations ne disqualifie en rien l'analyse économique, qui dispose au contraire des outils pour les révéler. Elle disqualifie simplement la vision des modèles économiques comme un outil de prévision.

Nous sommes donc à nouveau ramenés à l'irréductibilité des incertitudes qui pèsent sur la décision en matière de changement climatique. Nous avons mis en évidence l'intérêt des modèles comme outils d'agrégation et d'articulation de données permettant de réduire l'incertitude à la marge. La discussion que nous venons de mener reste cependant encore trop timide vis-à-vis de l'incertitude, qui reste pour ainsi dire « dans l'ombre ». Ce point ne serait pas gênant s'il ne contribuait en fait à masquer l'élément central pour la décision sur les politiques de long terme, à savoir le choix entre « utopies » concurrentes pour le futur. Il nous faut donc maintenant aborder l'incertitude de front la question du statut et du rôle des modèles économiques dans un tel contexte.

3. Sous controverses, le modèle pour hiérarchiser l'incertitude

L'analyse des conditions de l'élargissement de l'annexe B que nous avons menée aux chapitres 7 et 8 nous a permis de montrer comment la nature de la coalition qui émerge de la simple application par chaque pays des principes du calcul économique dépend du scénario de référence sur lequel ces pays se seront préalablement mis d'accord. Le calcul économique ne peut plus être convoqué pour dire ce que serait la bonne décision. Et la négociation porte maintenant sur des couples scénario futur – règle d'élargissement. Hourcade (1990a, 1991) rappelle qu'il s'agit là d'une configuration très générale de

« décision sous controverse » dans laquelle s’opposent des utopies concurrentes sur le futur, utopies constituées à la fois d’une vision du scénario de croissance : *« On ne compare plus des préférences individuelles, mais les projets que chaque acteur forme sur l’avenir collectif. L’arbitraire tant redouté surgit alors : il y a subordination logique du calcul à une prospective des états du monde, et incapacité à trancher « rationnellement » entre représentations concurrentes de ces états. Le calcul économique risque de participer à l’autovalidation d’une simple conjecture »* (1991, p.80).

Quel rôle, dès lors, pour le calcul économique ? S’ils ne peuvent trancher entre les futurs en compétition, les modèles économiques peuvent néanmoins servir à révéler la nature des différentes utopies en discussion. Ils permettent en outre d’explicitier la nature des hypothèses, éventuellement contradictoires, sous-jacentes à chacun des discours en compétition. Nous retrouvons ici l’utilisation des modèles comme « langage et enjeu de négociation » (Henry, 1984) : langage car le modèle permet de faciliter les échanges entre les différentes parties en négociation, enjeu car le contrôle de l’expertise peut être primordial pour les parties en présence⁶. Nous n’avons pas pour objet de proposer ici une théorie générale du rôle du calcul économique dans la négociation. Nous nous contenterons de proposer quelques réflexions sur la manière dont cet objectif peut se traduire dans le cas du changement climatique sur la base de deux exemples : la controverse entre WRE et HGH d’une part, et le Processus de Delft de l’autre.

3.1. Deux exemples d’utilisation des modèles dans le débat climatique

3.1.1. Les débats internes à la communauté scientifique : le « timing » de l’action face au réchauffement climatique

Nous avons déjà évoqué ce premier exemple au chapitre 2 (section 3.2) en restant sur un plan strictement technique. Nous élargissons ici le récit aux aspects de négociation. Nous sommes en janvier 1996. La question du « timing » de l’action face au réchauffement climatique, c’est-à-dire sur la date à laquelle il faut commencer à réduire les émissions ou au moins à investir en R&D, est alors sur le devant de l’agenda scientifique. La première Conférence des Parties de Berlin vient en effet de donner mandat aux différentes parties pour négocier des objectifs de réduction des émissions quantitatifs au-delà de l’an 2000 pour les pays de l’annexe I. La question du montant de cette contrainte, et donc de la date optimale du début de l’action, est alors critique.

En janvier 1996, Tom Wigley, Jae Edmonds et Richard Richels (WRE) publient dans la revue *Nature* un papier dans lequel ils présentent quatre trajectoires d’émissions entre 1990 et 2100 compatibles avec la stabilisation des concentrations atmosphériques à 450, 550, 650 ou 750 ppm. Contrairement aux trajectoires d’émissions conduisant aux mêmes niveaux de stabilisation présentées par le groupe I du GIEC en 1994, ces nouvelles courbes présentent la particularité de quitter plus tardivement la trajectoire d’émissions de référence (le décrochage intervient au plus tôt en 2010). Les auteurs justifient ce retard par trois facteurs : l’actualisation, l’inertie du capital qui empêche toute réduction des émissions trop rapide, et le progrès technique qui nous permettra de disposer demain de technologies de réduction des émissions moins chères qu’aujourd’hui.

Dans le texte de l’article, WRE suggèrent d’entamer dès aujourd’hui des actions de R&D. Mais la seule lecture des courbes qu’ils présentent laisse passer un tout autre message : il est urgent d’attendre. Théry (1997) montre comment ce papier a été rapidement exploité en ce sens : les courbes de WRE rejoignent en effet très rapidement le supplément technique du GIEC consacré aux émissions publié au tout début de l’année 1997. Elles y figurent exactement sur le même plan que les courbes originales du Groupe I du GIEC. Du point de vue de notre discussion, il est important de noter que le papier original de WRE n’est le résultat d’aucune analyse économique : il découle d’une simple utilisation d’un

⁶ Nous retrouvons ici l’un des fondements du calcul économique. Les ingénieurs économistes français du XIX^e siècle ont en effet inventé le calcul économique d’abord pour construire des arguments rationnels au nom de l’intérêt collectif qu’ils pouvaient opposer à « l’arbitraire du prince ».

modèle climatique. Ce n'est qu'ensuite que des simulations effectuées avec le modèle MERGE justifieront que les courbes d'émissions proposées par WRE sont économiquement plus intéressantes que les courbes proposées par le GIEC en 1994.

Les trois arguments invoqués par WRE à l'appui de leur thèse ne font pourtant pas l'unanimité, en particulier la question de l'inertie. Dès 1994 à l'IIASA, Hourcade et Chapuis avaient en effet insisté sur la nécessité d'un équilibre entre une action trop précoce qui pourrait s'avérer trop importante si la concentration atmosphérique en CO₂ se révèle finalement pouvoir atteindre un niveau élevé, et une action trop tardive qui nous placerait devant les coûts très élevés d'un abattement accéléré en cas de surprise climatique défavorable. Ces auteurs illustrent cet arbitrage par la métaphore automobile suivante : « *A driver on a mountain pass road in late winter speculating about the presence of ice on a bend before a precipice [...] wants to maximize his speed, but [...] the risks are too high, and the useful information about the ice [will] come too late given the inertia of the car. Consequently, his behavior is not to adopt once and for all an optimized trajectory but to release the accelerator pedal and to push slightly on the brake, ready to slow down if, as he proceeds, he sees ice in the bend or to accelerate if the road proves clear.* » (p.434). Le modèle DIAM (Grubb *et al.*, 1995) avait été développé spécifiquement pour illustrer cette dialectique entre inertie et adaptabilité.

Minh Ha-Duong, Michael Grubb et Jean-Charles Hourcade (HGH) envoient un papier de réponse à WRE dans la même revue *Nature* fin 1996. Parallèlement, ce papier va circuler largement dans la communauté scientifique internationale. Dans ce travail, le modèle DIAM est utilisé spécifiquement pour illustrer le rôle ambigu de l'inertie qui empêche des actions de réduction des émissions trop rapides aujourd'hui, mais aussi demain. Numériquement, la prise en compte du couple incertitude – inertie conduit environ à doubler les niveaux de réduction des émissions à l'horizon 2020, qui passent ainsi d'environ 6% à environ 12% (Ha-Duong *et al.*, 1997). L'argument va pourtant mettre beaucoup de temps à être accepté⁷. Le papier paraîtra finalement... juste à la veille de la Conférence de Kyoto.

S'il ne faut pas exagérer l'importance de cette controverse sur les positions des différents négociateurs⁸, il est important de noter comment l'introduction d'un outil numérique a pu contribuer à diffuser une idée fort simple sur le rôle de l'articulation entre incertitude et inertie pour la décision de court terme en matière d'effet de serre. Dans un contexte politiquement tendu, le terrain scientifique devient en effet un lieu de négociation parmi les autres. Et l'usage du calcul économique apparaît alors comme la protection minimale pour éviter que l'idée défendue ne soit immédiatement disqualifiée.

3.1.2. Le débat entre modélisateurs et décideurs : le processus de Delft

L'exemple suivant provient des Pays-Bas, et il met en scène un dialogue entre modélisateurs et décideurs. Nous devons cependant indiquer d'emblée que nous ne disposons pour son analyse que des documents publiés par le centre de recherche hollandais en question (Alcamo *et al.*, 1996, Van Daalen *et al.*, 1997). Notre propos devrait donc être complété par une étude systématique du processus de dialogue qui permettrait de mieux comprendre à la fois le contexte, les enjeux, le déroulement et les résultats de ce dialogue.

Tout commence en 1995, lorsque la première Conférence des Parties tenue à Berlin décide de négocier d'ici à COP-3 des cibles d'émissions contraignantes pour les pays de l'annexe I au-delà de l'an 2000. Une série de réunions de travail est alors organisée entre les décideurs hollandais et ceux d'autres pays européens (ou plus exactement leurs conseillers techniques) et les modélisateurs de l'Institut National Hollandais pour la Santé et l'Environnement (RIVM) qui a bâti le modèle IMAGE, large modèle intégré d'évaluation du changement climatique (Alcamo et Kreileman, 1998). Cette succession de

⁷ La validité économique du paramètre introduisant l'inertie dans le modèle DIAM sera en particulier fortement discutée et contestée, par exemple dans Edmonds *et al.* (1997).

⁸ Pour mémoire, rappelons que le protocole de Kyoto décide d'efforts de réduction des émissions des pays de l'annexe B nettement supérieurs à tout ce qui avait pu être proposé dans la littérature, HGH compris.

rencontres régulières, dit processus de Delft, a pour objet d'examiner comment le modèle IMAGE peut aider les négociateurs dans leur tâche.

Alcamo *et al.* (1996) présentent les résultats des trois premiers séminaires de travail tenus entre 1995 et 1996. Lors du premier échange, les décideurs ont présenté une série de mesures climatiques réalistes dont ils souhaitaient examiner les impacts. L'utilisation du modèle IMAGE a ensuite permis de montrer, ou plutôt de confirmer que ces mesures n'auraient d'impact que si elles constituaient les premières étapes d'un processus d'abattement de long terme. Ces résultats ont été présentés lors de la seconde rencontre, et la troisième a permis d'élaborer l'idée « d'un atterrissage contrôlé » des concentrations atmosphériques en CO₂, consistant à déterminer un corridor d'émissions permettant de stabiliser les concentrations à un niveau acceptable.

De ce qu'il est possible d'en juger avec la présentation qu'en font Alcamo *et al.*, le processus de Delft a permis d'instaurer un dialogue fructueux entre les décideurs et les modélisateurs de l'équipe du RIVM. Ces séminaires ont en particulier permis de faire réfléchir les modélisateurs comme les décideurs sur la temporalité : le long terme nécessaire pour que les politiques climatiques soient efficaces dans un sens, mais aussi les demandes et les contraintes concernant nécessairement le court terme de la part des décideurs et de la Société. Le modèle IMAGE, et en particulier des outils graphiques très puissants qui ont été construits autour de lui a contribué à rendre plus parlants aux décideurs les impacts possibles des différentes mesures qu'ils pouvaient mettre en œuvre.

3.1.3. Deux natures d'exercices

Dans l'article original de Claude Henry (1984), la notion de microéconomie comme « langage de négociation » est développée sur la base de l'exemple de l'aménagement d'une rivière en Angleterre. Dans ce cadre hautement conflictuel, chacune des parties en présence mobilise successivement le calcul économique pour contester des études qui lui sont défavorables. Nous sommes donc sur le terrain de la bataille d'expertise. Des deux cas que nous venons de présenter, le débat entre WRE et HGH est sans conteste l'exemple qui s'en rapproche le plus. Il y a en effet querelle d'expertise, en l'occurrence sur le rôle de l'incertitude et de l'inertie dans les politiques climatiques, qui se résout par mobilisation contradictoire des modèles économiques.

Le processus de Delft est au contraire un processus coopératif dans lequel modélisateurs et décideurs échangent autour d'un modèle numérique. Nous sommes ici plus proches des exercices de prospective « chaude » (Mermet et Piveteau, 1997) dans la lignée de ceux qui ont été réalisés à l'IIASA à l'aide du modèle RAINS (Mermet et Hordijk, 1989). Malgré l'intérêt pédagogique évident de tels exercices, nous pouvons nous interroger sur un double risque qu'engendre ce type de processus : le risque de glissement sur la signification des résultats d'un modèle tel qu'IMAGE, et le risque du consensus.

IMAGE constitue en effet un modèle intégré particulièrement complexe, dans lequel il n'est pas évident de rentrer sans disposer de beaucoup de temps et de solides connaissances en informatique. Une interface spécifique permet par contre de manipuler très facilement quelques unes des variables du modèle. La complexité du modèle alliée à la simplicité de l'interface invite fortement à n'utiliser que cette dernière, en ayant l'illusion que l'on est « entré » dans le modèle. Or il n'en est rien, puisque le code informatique lui-même reste inaccessible.

De plus, un module graphique très puissant produit des cartes très détaillées des impacts du changement climatique. Comme nous l'avons souligné plus haut, il n'est pas évident d'avoir toujours présent à l'esprit le fait qu'il ne s'agit au mieux que d'un futur possible, mais en aucun cas d'une prévision. L'équipe du RIVM a délibérément assumé ce risque en acceptant de publier des cartes d'impacts « *This opened up them up to the valid criticism that geographic calculations are usually more uncertain than regional or global averages. But at the same time it provided a powerful vehicle for policy makers and their advisors to visualize that it was their country that would be affected by [...] climate change.* » (Alcamo *et al.*, 1996, p.258).

En dernier lieu, le fait de faire travailler un groupe de décideurs très large, ici européens, sur un seul modèle, augmente les risques de voir les différents participants oublier qu'il subsiste encore quelques incertitudes. Dans un contexte dans lequel s'affrontent nécessairement différentes visions du futur, l'idée selon laquelle les modèles intégrés devraient être co-produits par de larges groupes de décideurs et de scientifiques (Alcamo *et al.*, 1996, Rotmans, 1998, Jäger, 1998) nous apparaît très dangereuse, en ce sens qu'elle masque la controverse inévitable sur la coordination des anticipations. Elle risque en outre de renforcer à l'extérieur l'idée selon laquelle le modèle en serait plus fiable, puisque un grand nombre de personnes ont contribué à son élaboration. Or il nous semble plutôt que plus un grand nombre de personnes est commis à une erreur, plus il est difficile de faire marche arrière. Le modèle peut donc servir de base à des exercices prospectifs, ou être présentés et critiqués une fois construit par d'autres scientifiques ou par des décideurs, mais qu'il soit construit suivant un processus participatif paraît être le type même d'une fausse bonne idée.

3.2. De l'intérêt des modèles économiques de long terme comme « langage de négociation »

Les deux exemples qui précèdent nous ont permis de faire apparaître les avantages des modèles économiques de long terme pour faciliter la discussion et la négociation sur politiques à mener face au réchauffement climatique. Nous avons en particulier noté le rôle clé de l'explicitation des hypothèses implicites de chacune des Parties et de la possibilité de faire apparaître des effets de type équilibre général. Nous complétons maintenant cet examen des qualités des modèles comme « langage de négociation » par une discussion de nature plus fondamentale sur l'intérêt du langage mathématique et de l'informatique.

3.2.1. Des avantages du langage mathématique

Evoquer le rôle du langage mathématique dans une thèse d'économie présente le risque de nous entraîner sur la question du rôle du formalisme mathématique dans la science économique. Nous n'avons pourtant pas les moyens de nous engager dans cette controverse vieille d'au moins un siècle et demi (Krugman, 1998). Nous nous limitons donc ici strictement aux mathématiques comme outil de négociation dans les modèles climatiques. L'intérêt de ce langage pour la négociation nous semble devoir essentiellement être recherché dans les propriétés intrinsèques de cet « idiome », et de la manière dont il est perçu par les différentes parties en présence. Nous distinguons ci-dessous quatre propriétés principales :

- Aptitude à rendre compte de la complexité : nous avons déjà noté plus haut le fait que le langage mathématique permet de rendre compte de raisonnements économiques complexes et constitue ainsi un outil privilégié pour examiner des chaînes causales longues ou des raisonnements en boucle (Arrow, 1951, Guesnerie, 1989).
- Cohérence : les règles logiques du formalisme mathématique permettent, si elles sont respectées, d'assurer la cohérence logique des différentes équations du modèle. Il est en particulier possible d'identifier la présence d'hypothèses contradictoires.
- Exhaustivité : il n'est possible d'obtenir un résultat, c'est-à-dire une simulation, que si les paramètres d'entrée sont tous donnés, et si les formes fonctionnelles du modèle sont complètement spécifiées. La conception et l'utilisation d'un modèle numérique exige donc que toutes les hypothèses soient traduites en langage mathématique, et par là même explicitées. Nous avons cependant rappelé dans la première section les difficultés qui entourent la numérisation des hypothèses qualitatives formulées sur le futur. Nous avons en outre évoqué dans le premier chapitre la difficile question de la monétarisation des impacts du changement climatique. Au moins construire un modèle oblige-t-il à expliciter le processus de traduction des hypothèses et jugements de valeur qualitatifs en nombres utilisables par la machine, ce qui est mieux que de ne pas les examiner du tout.

- Neutralité : Dans des discussions entre communautés scientifiques dont les postulats, les méthodes, les concepts et les paradigmes sont très différents, le langage mathématique constitue un territoire relativement « neutre », que Roger Guesnerie appelle un « espace de laïcité intellectuelle » (1989). Les glissements sémantiques qu'autorise le vocabulaire économique sont ici éliminés, en contrepartie de la nécessité de s'entendre sur l'interprétation des différentes grandeurs qui sont représentées par le modèle. Le langage mathématique présente en outre l'intérêt d'être universel.

Outre les limitations de la traduction numériques des hypothèses qualitatives, la clarté du langage mathématique demande aussi à être discutée dès lors que les modèles deviennent un peu importants. Pour des outils numériques de petite taille comme la famille des STARTS développée ici, le risque n'est pas très important. Pour des modèles aussi gros qu'IMAGE, il est par contre exclu que l'on puisse en appréhender l'intégralité par la lecture des équations. Il faut alors trouver des procédures de mise en forme de l'information, ce que permet l'informatique.

3.2.2. De la simulation informatique

L'augmentation très importante de la puissance des moyens de calcul a permis de développer deux aspects importants des modèles économiques de long terme comme outils de communication. Ils peuvent d'une part mieux rendre lisibles les résultats des simulations, et d'autre part traiter rapidement un nombre toujours plus grand d'alternatives possibles.

Les outils de présentation informatiques permettent tout d'abord de faciliter l'accès au modèle. En pratique, ils facilitent souvent uniquement l'accès aux grandes hypothèses d'entrée et aux résultats, en laissant le fonctionnement du modèle lui-même dans l'ombre d'un code informatique abscons. Le point important est que l'ordinateur permet de visualiser au moyen de graphiques divers, de diagrammes ou de cartes, une grande quantité d'informations sous une forme à la fois synthétique et attrayante. Néanmoins, s'agissant d'une couche supplémentaire bâtie sur le modèle lui-même, une telle interface présente aussi des risques dans la mesure où l'utilisateur n'est plus libre de tout explorer, mais se trouve guidé vers tel ou tel aspect du modèle. Les interfaces développées autour du modèle IMAGE constituent un bon exemple tant de ces avantages que de ces défauts.

En second lieu, la possibilité d'effectuer des simulations multiples permet d'envisager d'une part de tester de nombreuses politiques, et d'autre part de mettre en œuvre de manière plus rapide les nombreuses procédures de test de sensibilité des résultats à l'incertitude existantes. La vitesse de calcul ouvre ainsi la voie à une exploration systématique des résultats d'un modèle sur laquelle nous reviendrons dans la section suivante. Ces développements permettent en particulier d'envisager des explorations numériques de très vastes zones de paramètres, d'utiliser des techniques de programmation dynamique stochastique ou encore des processus aléatoires afin de mieux explorer et rendre compte de l'incertitude (Kann, 1999, Dowlatabadi, 1999).

3.3. Les modèles économiques pour hiérarchiser l'incertitude

Envisager le calcul économique comme « langage et enjeu de négociation » revient ainsi à reconnaître son intérêt pour expliciter, derrière les différents discours, la nature des différentes visions du futur en compétition. Nous venons de voir que les propriétés intrinsèques du langage mathématique et sa traduction informatique permettaient un tel usage. La notion de « décision séquentielle » que nous avons abordée au chapitre 2 apparaît ouvrir la voie à un troisième usage des modèles économiques de long terme en présence de controverses.

En effet, puisque l'information est croissante, nos décisions seront très certainement révisées dans le futur. Par conséquent, la seule décision qui compte est maintenant la décision de court terme, et non plus l'ensemble de la trajectoire comme dans l'analyse coûts avantages standard. Il se pose dès lors la question de savoir dans quelle mesure les incertitudes de long terme pèsent effectivement sur la

décision de court terme. Rappelons ici la citation d'Alan Manne et de Richard Richels que nous avons déjà mise en exergue au chapitre 3 : « *We do not need to be overly concerned by our inability to predict the detailed character of the energy system several decades into the future. Uncertainty is important only to the extent that it confounds near-term decision-making. Today's decision appear to be relatively insensitive to some of the most controversial long-term uncertainties in the greenhouse debate.* ».

Nous avons vu analytiquement et numériquement au chapitre 3 que ce changement de perspective ouvre un champ de recherche tout à fait important et potentiellement très riche. Nous en avons exploré une petite partie en centrant notre analyse sur le taux d'actualisation. Ce travail nous a permis de montrer que pour la décision de court terme, l'incertitude sur la forme de la fonction dommages prime. Si la fonction dommages est linéaire, alors la pente de ces dommages et le taux d'actualisation vont avoir à peu près le même impact sur la décision de court terme. Si la fonction dommages est au contraire « explosive », alors le seuil du danger devient prépondérant par rapport au taux d'actualisation.

Ces premiers résultats restent bien entendu très parcellaires. Ils nous semblent néanmoins suffisamment intéressants pour justifier une exploration plus systématique de la hiérarchie des incertitudes qui pèsent sur la décision de court terme. Du point de vue de la négociation, la décision séquentielle ouvre ainsi un troisième champ au calcul économique, qui après avoir contribué à cerner l'incertitude puis à démêler l'incertitude, peut maintenant contribuer à la hiérarchiser. Sans trancher entre les visions du monde en compétition, l'économiste est ainsi en mesure d'indiquer les controverses réellement significatives pour la décision de court terme.

Approfondir ce troisième usage des modèles économiques de long terme dans la négociation suppose cependant des progrès importants sur le plan méthodologique. En effet, nous avons vu au chapitre 2 les difficultés théoriques liées au traitement des incertitudes endogènes, c'est-à-dire pour lesquelles les probabilités subjectives *a priori* dépendent de la trajectoire qui a été suivie. Il s'agit d'une difficulté qu'il est nécessaire de surmonter. En second lieu, la présence de mécanismes induits et d'équilibres multiples constitue un autre défi tout aussi redoutable pour la hiérarchisation des incertitudes. Il n'en reste pas moins qu'elle ouvre des pistes prometteuses pour l'utilisation des modèles économiques de long terme.

3.4. Quelques perspectives de nature institutionnelles pour garantir le « bon usage » des modèles dans l'analyse

Concluons ces considérations générales par quelques réflexions sur l'organisation institutionnelle permettant aux modèles économiques de long terme de remplir effectivement ce triple rôle de réduction, de démonstration et de hiérarchisation de l'incertitude, dans un contexte de négociation dans lequel une partie au moins des acteurs peut avoir un intérêt stratégique à contrôler ou même à éliminer toute discussion fondée sur le calcul économique (Hourcade, 1990a). Cette organisation est rendue d'autant plus difficile que les contresens sur la capacité des modèles économiques de long terme à apporter des réponses définitives restent, nous l'avons vu, très répandus.

Les modèles économiques de long terme marchent ainsi sur la corde raide, puisqu'ils présentent des images du futur qu'un œil non averti peut facilement prendre pour des projections, et ce d'autant plus que la taille du modèle est importante et la représentation en apparence plus fine et plus détaillée. Le risque est alors très grand de voir les résultats de ces modèles utilisés de manière incontrôlée dans le processus de négociation et pour influencer l'opinion, au risque *in fine* de jeter les bases d'un rejet général tout aussi dommageable de toutes approches numériques. Difficulté supplémentaire, il est

d'autant plus difficile aux modélisateurs de mettre en avant le fait que leurs modèles ne sauraient fournir de prévisions qu'ils ont besoin de rassembler des fonds importants pour leur travail⁹.

Nous nous limiterons ici à indiquer les quelques pistes que nous suggère notre modeste expérience en la matière, en évoquant deux axes : la nature des scènes sur lesquelles la confrontation des modèles peut être présentée, et la formation des traducteurs. Nous avons vu que l'incertitude nécessite de travailler avec plusieurs modèles. Il donc est nécessaire d'organiser régulièrement des comparaisons publiques entre différentes approches internationales, dans lesquelles l'équilibre entre le « tout se vaut » et le « modèle unique » doit être respecté¹⁰. Le processus du GIEC représente aujourd'hui une réussite dans ce domaine, mais une réussite fragile qu'il faut conserver.

En second lieu, l'utilisation des modèles dans le débat pose la question de la formation des intermédiaires, c'est-à-dire des personnes qui vont avoir à traduire les résultats de la modélisation utilisables pour la décision. Nous avons rencontré dans ce chapitre les conseillers techniques des divers ministères, mais aussi les journalistes qui s'adressent au grand public. Il serait illusoire de penser que ces personnes puissent toutes disposer d'une compétence technique approfondie sur la modélisation elle-même. Mais là n'est pas à notre sens la question principale : le fait de reconnaître l'incontournable existence de l'incertitude constituerait déjà un pas très important dans le sens d'une meilleure utilisation des modèles économiques de long terme dans le débat public. Une compréhension des rapports entre le calcul économique et la décision en serait un autre. Nous touchons ici à un double problème de formation et de présentation de leurs travaux par les modélisateurs eux-mêmes qui dépasse largement le cadre de cette thèse.

Conclusion : Retour sur nos résultats

Au terme de ces considérations générales sur le statut des modèles économiques de long terme en univers controversé, nous revenons maintenant sur les résultats que nous avons obtenus dans cette thèse pour évaluer ce qui subsiste malgré l'incertitude. Rappelons tout d'abord brièvement la démarche que nous avons suivie. Nous sommes partis de l'observation suivante : les dommages futurs du changement climatique comme les coûts de réduction des émissions des gaz à effet de serre sont largement incertains. Ce constat est certes trivial, mais il n'en est pas moins lourd de conséquences pour la décision. En premier lieu, l'arbitrage temporel entre les coûts de la politique climatique aujourd'hui et les bénéfices de la limitation du changement climatique demain dépend maintenant de notre jugement sur la probabilité d'occurrence des différentes fonctions de dommages et de coûts possibles. Nous devons de plus tenir compte du fait que les choix que nous faisons aujourd'hui sont susceptibles d'être révisés demain avec l'arrivée de nouvelles informations. Plus encore, l'incertitude radicale sur les comportements de nos descendants prend dans ce contexte une importance particulière puisque nous ne sommes plus du tout assurés qu'ils se formeront la même image que nous des paramètres incertains. Dans ces conditions, discuter d'un objectif climatique et d'une distribution temporelle des coûts des politiques climatiques se révèle pour le moins problématique, et complique d'autant la négociation internationale sur la répartition des efforts de réduction des émissions.

Si constater la présence d'incertitudes dans le domaine climatique constitue une remarque triviale, il apparaît donc nécessaire de pousser à leur terme les conséquences logiques de cette configuration pour la décision. Pour ce faire, nous avons abordé successivement trois niveaux de discussion. Dans un premier temps, l'analyse numérique de la décision sous incertitudes en matière de changement climatique nous a permis d'articuler les différents éléments de la discussion et de donner corps à la

⁹ Un modèle comme IMAGE a mobilisé environ 100 hommes ans pour être construit. Il n'est pas évident de mobiliser les fonds nécessaires à une telle entreprise au seul motif qu'elle permettra des exercices de prospective de très haut niveau.

¹⁰ Cette gestion de l'équilibre entre une nécessaire revue par les pairs et une non moins nécessaire pluralité des approches est un combat qui dépasse largement le seul cadre des modèles économiques de long terme.

notion de « décision séquentielle ». Remontant dans un second temps à l'analyse théorique, nous avons d'abord examiné les conditions de la séparabilité entre distributions spatiales et temporelles des coûts des politiques climatiques, et nous avons montré comment l'incertitude nous conduit à poser la question de la distribution intergénérationnelle en termes de nature de l'héritage. Subsiste néanmoins une incertitude fondamentale entre les différentes « visions du monde futur » en compétition. Or le calcul économique se révèle incapable de trancher entre ces différentes utopies, puisqu'il crée les conditions de leur réalisation. Fort de ce questionnement, nous avons abordé dans un troisième temps la question de la négociation sur les futures limitations d'émissions que pourraient souscrire les pays en voie de développement.

Au terme de cette démarche, nous avons mis en évidence un premier résultat d'ordre méthodologique. Nous retrouvons le fait que dans un contexte d'incertitudes, le calcul économique perd toute prétention à « dire le vrai » et à discriminer entre les différents futurs possibles. Le résultat du calcul dépend en effet d'un contexte qui est lui-même fabriqué par ce résultat. Ce résultat négatif ne doit cependant pas être interprété comme un argument pour disqualifier tout discours de nature économique au motif qu'il serait dépendant de l'incertitude. Si les modèles que nous avons construits ne sont pas capables de réduire totalement l'incertitude, nous avons montré qu'ils présentent un double intérêt pour la négociation. Ils peuvent d'une part démêler l'incertitude, et du même coup les différentes visions du monde en compétition. Ils permettent d'autre part de hiérarchiser l'incertitude en isolant parmi toutes les controverses celles qui comptent vraiment pour la décision de court terme. Profiter des modèles comme « langage de négociation » demande cependant de réfléchir à la nature du système institutionnel capable de leur garantir une utilisation correcte.

L'argument qui précède, et plus globalement l'ensemble de la discussion que nous avons menée dans ce chapitre, montre qu'il serait illusoire de rechercher des réponses définitives quant aux politiques climatiques que nous devrions mettre en œuvre. Ceci dit, nous pouvons tout de même mettre en avant des conclusions de nature plus substantives que les seules considérations méthodologiques que nous venons de résumer. Il s'agit pour l'essentiel d'éléments de cohérence qui induisent des résultats qualitatifs partiels, mais robustes à l'incertitude. On mesurera la distance parcourue par rapport à l'ambition des ingénieurs économistes de fonder rationnellement la décision. A cette image triomphante de l'économiste géomètre, il nous faut substituer celle, plus modeste, de l'archéologue qui rassemble petit à petit les éléments d'un puzzle dont il sait d'avance qu'il ne verra jamais la totalité. Ces pièces constituent néanmoins autant d'indices, ou, pour reprendre le terme anglais, autant d'« *insights* », sur la nature des politiques climatiques à suivre et la manière de les négocier. Et si Michael Grubb, dans la citation que nous avons reprise plus haut, souligne les progrès des modèles économiques de long terme, c'est au sens qu'ils apportent toujours plus de ces indices.

Quels sont donc les « *insights* » de cette thèse ? Nous en comptons cinq. En premier lieu, nous avons étendu le modèle de Bowen-Lindhal et Samuelson à un bien public futur caractérisé à la fois par un décalage temporel important entre production et consommation, mais aussi par une consommation elle-même échelonnée dans le temps. Ce travail théorique nous a permis de repérer les éléments de cohérence logique entre distributions spatiales et temporelles des politiques climatiques. Nous avons vu que le point clé est ici la manière dont sont coordonnés ou non les taux d'actualisation des différents individus. Si le planificateur ne peut imposer un taux d'actualisation commun, ce que nous avons appelé la « solidarité dynastique », alors à au moins une période tous les efforts d'abattement sont concentrés sur un seul groupe de région. Si au contraire les différents agents s'accordent sur un taux d'actualisation commun, ce que nous avons appelé « solidarité universelle », alors il est possible de trouver une distribution des coûts qui fasse que toutes les régions à toutes les périodes contribuent au financement du bien collectif.

En second lieu, l'analyse de ce modèle nous a permis de montrer que dès lors que les consommations de bien privé à deux périodes différentes sont indépendantes, et que les dommages du changement climatique n'étaient pas catastrophiques par rapport à la richesse totale, alors la distribution spatiale des coûts d'abattement à la première période est indépendante de la distribution temporelle des coûts en général, et de la distribution géographique des impacts en particulier. Ce résultat n'est en outre pas

remis en cause si l'incertitude pesant sur les fonctions de dommages, les fonctions de coûts ou les taux de croissance est introduite dans le modèle. Il nous faut néanmoins rappeler ici que nous avons travaillé dans le cadre d'un bien public futur produit de manière centralisée. Or Chichilnisky et Heal rappellent que le bien public climat est au contraire produit de manière décentralisée. Ces premiers résultats demandent donc à être repris dans le cadre plus général d'un bien public futur, incertain et produit de manière privée.

En troisième lieu, nous avons été conduits à rejeter l'idée implicite mais courante dans la littérature selon laquelle le débat sur l'arbitrage entre court terme et long terme pourrait être résumé par la seule discussion sur la valeur du taux d'actualisation. Nous avons en effet mis en évidence les éléments de cohérence interne aux modèles de croissance qui font que le taux d'actualisation dépend en fait d'un jeu d'hypothèses portant à la fois sur la croissance et les comportements futurs ainsi que sur la nature des sacrifices acceptables pour la génération présente. En outre, l'impact de ce paramètre sur la décision de court terme apparaît plus faible que celui d'autres incertitudes, comme celles portant sur la nature de la fonction dommages par exemple.

De manière plus positive, la présence d'incertitudes nous a conduit à repenser de manière fondamentale la nature de l'arbitrage entre aujourd'hui et demain. Dans l'ignorance des décisions que prendront nos descendants, nous argumentons que ce qui importe de manière centrale est la nature de l'héritage que nous leur transmettons. Or, dans un contexte où l'information est croissante, cet héritage ne peut être résumé par la simple donnée d'une quantité de richesses totale ou d'une qualité de l'environnement. Il doit au contraire être décrit de manière plus détaillée comme un ensemble de systèmes techniques dont les degrés de flexibilité plus ou moins importants. L'appréciation des marges de manœuvre ou des inerties que nous léguons ainsi, souvent sans nous en rendre compte, se révèle en effet centrale pour évaluer les politiques climatiques que pourraient avoir à mettre en œuvre nos descendants, et les comparer ensuite aux coûts que notre génération devrait supporter pour les leur transmettre.

Nous terminerons cette conclusion en revenant plus largement sur le cinquième de ces résultats, qui concerne la négociabilité des règles d'élargissement de l'annexe B. Nous n'avons en effet pas tiré l'ensemble des enseignements des chapitres 7 et 8. Rappelons qu'alors même que nous n'avons examiné que le choix entre deux règles d'élargissement, et que nous avons uniquement considéré l'incertitude sur la trajectoire de référence, nous avons vu émerger numériquement des coalitions qui, du point de vue de leurs intérêts dans le dossier climatique, ont de fortes chances de s'opposer lors de la négociation. La négociation sur des règles *ad hoc* formulées pour éviter l'incertitude ne semble donc pas constituer une bonne solution. Le risque est en effet très important de voir une configuration de « risque inversé » (Roqueplo, 1988) l'emporter dans la négociation. Dans ce contexte, chaque Partie en présence est ainsi susceptible de s'opposer à un accord au nom d'un état du monde futur dans lequel elle serait désavantagée¹¹. Par conséquent, la peur de voir son adversaire utiliser l'incertitude

¹¹ L'impact des incertitudes sur la trajectoire de croissance aurait-il été plus faible dans le cadre d'une coordination par les quantités ? Sans pouvoir le démontrer ici de manière rigoureuse, il nous semble intuitivement que la réponse devrait être positive. Notons en premier lieu que trouver un accord à une date donnée est plus facile dans le cas des taxes, puisque la négociation porte directement sur les coûts d'abattement en évitant les incertitudes sur les coûts d'abattement. Cependant, les anticipations sur le niveau futur de la taxe sont très importantes pour déterminer la nature des politiques d'abattement qui seront effectivement mises en œuvre par les agents économiques. Les différentes parties doivent donc s'accorder sur les déclarations qu'elle feront quant aux niveaux futurs des taxes. La question du scénario de croissance ressurgit évidemment à ce niveau.

Néanmoins, la règle d'allocation des coûts d'abattement (au problème du passage entre un coût marginal et un coût total près) peut être définie de manière indépendante du scénario de croissance, par exemple en travaillant sur des règles de distribution au prorata de la consommation par tête. Nous évitons ainsi le premier écueil mentionné au dessus à savoir le fait que les règles d'allocation des quotas ne mènent pas à une distribution contrôlable des coûts d'abattement. Une telle règle distributive étant adoptée, la négociation ne porte plus que sur le niveau général de l'effort climatique, faible ou élevé. Sur ce dernier paramètre, il nous semble que l'incertitude relative au taux de croissance future devrait se révéler plus faible, mais ce point demande confirmation.

comme une arme stratégique aboutit finalement à un blocage. Ce risque est d'autant plus important que l'incertitude porte à la fois sur la valeur des coûts d'abattements (Weitzman, 1974, Newell et Pizer, 1998) et sur les hypothèses générales sur la croissance à long terme.

A long terme, c'est-à-dire pour les période budgétaires postérieures à 2012, ces résultats militent pour passer d'une coordination par les quantités à une coordination par les prix. Cette position est défendue depuis longtemps au CIREN (Godard et Hourcade, 1991, Hourcade, 1994), et rassemble depuis peu une majorité d'économistes travaillant sur le changement climatique. Cependant, le cadre du protocole de Kyoto reste incontournable à court et probablement à moyen terme. Comme le rappelle Jeffrey Frankel : « *Whatever one thinks of the odds of enactment – the [Kyoto] Protocol is clearly the framework within which policy-makers are going to be addressing this subject for some years to come. Thus any research that is to be useful to policy-makers in the short-term has to take as given such features as given quantitative targets* » (1998, p.2). Nous devons donc réfléchir aux moyens de terminer le « *Kyoto's unfinished business* », pour reprendre l'expression de Jacoby *et al.* (1998).

Une première solution à ce dilemme réside dans le dessin institutionnel des mécanismes de flexibilité qui accompagneront les quotas d'émissions¹². Kopp *et al.* (1999) envisagent ainsi un système hybride entre coordination par les prix et coordination par les quantités en adjoignant au système des PEN, une soupape de sécurité, en l'occurrence un volant de permis additionnel à prix élevé permettant de relâcher la pression en cas de surcoût imprévu. Un tel mécanisme peut être comparé à un système de sanctions pour non respect des engagements. Par ailleurs un prix-plancher peut aussi être fixé afin d'obliger à des réductions domestiques. Un tel système institutionnel permettrait de rassurer à la fois ceux qui pensent que les coûts des politiques climatique seront très élevés, et ceux qui, à l'inverse, font l'hypothèse que réduire les émissions se fera à un coût très faible.

Une autre voie de sortie peut être trouvée si l'on se rend compte que l'analyse qui précède ne prend pas en compte la possible existence de potentiels sans regret ou de double dividende dans les pays développés comme dans les pays en voie de développement. Si l'on accepte l'existence de tels potentiels, un compromis de nature institutionnelle devient possible : il s'agit de trouver des cadres capables de garantir que la plupart des revenus de ces options sans regret restent au sein des pays en voie de développement. Dans le cas d'un marché de PEN, il existe certes un risque non nul que pour des raisons de compétitivités industrielles les Etats donnent gratuitement une partie de leurs permis aux entreprises, ce qui limiterait d'autant l'ampleur d'un double dividende potentiel. Cependant, le fait que la mise en place de mécanismes de flexibilité viennent selon le protocole de Kyoto en complément à des politiques et mesures domestiques ouvre un espace de manœuvre considérable pour faire émerger de tels potentiels.

La modélisation économique débouche donc finalement sur une réflexion de nature institutionnelle sur la forme des compromis qui permettent d'adapter le Protocole de Kyoto à la diversité des situations des pays en voie de développement, et de maximiser les chances d'un accord international sur la question climatique malgré les différences d'intérêts, de visions de l'équité, et malgré l'incertitude. Cette approche pourra paraître très peu ambitieuse, et somme toute très pessimiste au lecteur, mais elle nous semble relativement réaliste. Rappelons-nous qu'après son passage au « *Council of Economic Advisors* », la question centrale posée par Joseph Stiglitz est la suivante : « *Why is it so difficult to implement even Pareto improvements?* ». Or, les politiques considérées ici ne rentrent pas dans cette catégorie, mais dans celle des « *near Pareto improvements which bring diffused benefits to a large group but at a well defined cost for a narrowly defined group* » (Stiglitz, 1998, p.8). Dans un contexte de très fortes incertitudes, parvenir à mettre en œuvre ces améliorations « quasi parétiennes » en réformant les mécanismes de coopération actuellement en œuvre pourrait finalement s'avérer une contribution plus efficace à l'équité que n'importe quel type de formule *ex ante*.

¹² Une autre solution pour éviter les risques de blocages de la négociation tout en restant dans le cadre d'une coordination par les quantités consisterait évidemment à allouer des contraintes d'émissions très laxistes : une telle allocation réduirait en effet les tensions à propos de l'équité, mais aurait aussi pour conséquence fâcheuse de miner l'objectif final de la Convention Cadre sur le Changement Climatique en faisant entrer une quantité importante d'abattements fictifs dans le système.

Conclusion

Dans cette thèse, nous nous sommes volontairement limités aux outils les plus simples de la boîte à outils économiques : l'analyse coûts avantages, le taux d'actualisation ou, concession à la modernité, la valeur d'option. Ces instruments se sont cependant révélés suffisants pour mettre en évidence la primauté du débat sur les « visions du monde ». Ils se sont en outre montrés capables de faire émerger de cet « océan d'incertitudes » des résultats, certes partiels, mais robustes à l'incertitude, et susceptibles d'informer le débat sur les politiques à suivre face au changement climatique.

La perspective que nous pouvions avoir sur cette démarche a ainsi fortement évolué au fil de ces pages. Dans l'introduction, nous avons en effet motivé notre choix de simplicité par le souci d'y voir clair devant la multiplicité des discours sur la précaution comme sur le développement durable. Mais à l'issue de ce travail, il apparaît en fait que pour mieux réfléchir à ces notions, la priorité n'est pas de développer un outillage théorique plus élaboré, mais de mieux prendre en compte d'abord, au sein du cadre théorique existant, les éléments clés du problème climatique : inerties différentielles, incertitudes ou arrivée de l'information par exemple.

Dans cette optique, nous n'avons bien entendu parcouru qu'une petite partie du chemin. Au-delà des résultats que nous avons résumés au dernier chapitre, notre analyse débouche en effet sur trois questions incontournables et difficiles, à la fois empiriques et théoriques, qui constituent autant de limites à notre travail, et autant de pistes pour des développements futurs : l'évaluation des coûts d'abatement, la prise en compte du progrès technique induit et des équilibres multiples et la compréhension de l'articulation entre anticipations et inerties pour le fonctionnement d'un marché de permis d'émissions négociables.

En premier lieu, les modèles de la famille STARTS souffrent d'une représentation et d'une évaluation des coûts d'abatement pour le moins limitées. À défaut de disposer d'un modèle technico-économique détaillé, un examen approfondi des résultats des principaux modèles mondiaux et de la littérature empirique disponible devrait au moins nous permettre de fonder nos courbes de coûts régionales sur des données techniques relativement précises. Pour avoir un minimum de sens, cette opération demande cependant à être conduite sur la base d'un modèle comprenant au moins quatre secteurs : habitat, transport, industrie et énergie. Mais outre les aspects technologiques, un traitement correct des coûts oblige à travailler dans une seconde direction : il nous faut revenir sur la discussion théorique et empirique sur le double-dividende économique et les potentiels sans regret.

L'évaluation des coûts nous amène naturellement à la seconde limite des modèles que nous avons développés : la non prise en compte du progrès technique induit et des équilibres multiples. Il nous faudrait introduire des mécanismes cumulatifs jouant sur des technologies en concurrence pour la production d'un même bien ou service afin d'introduire la possibilité d'équilibres multiples et de « *lock-in* » technologiques. De tels modèles soulèvent cependant des problèmes mathématiques et empiriques particulièrement ardues. En outre, nous avons souligné les limites théoriques qui pèsent sur l'évaluation des politiques publiques dans ce contexte ou les incertitudes deviennent endogènes. Les tentatives récentes dans ce domaine (Grübler et Gritsevskii, 1997) et l'abondante littérature sur la croissance endogène (Aghion et Howitt, 1999) suggèrent néanmoins des pistes pour commencer à travailler, et tâcher de limiter ainsi l'écart que le lecteur aura pu mesurer au chapitre 6 entre le raisonnement théorique sur la nature du legs et les maquettes numériques convoquées pour l'illustrer.

Enfin, en ce qui concerne la représentation de la dynamique d'un marché de permis d'émissions négociables, le modèle développé au chapitre 8 est entendu très limité. Son défaut le plus fondamental réside dans sa représentation très frustrante du comportement des agents, qui ne prennent leurs décisions à chaque période qu'en fonction de leur demande et du prix instantané sur le marché des permis. Il est clair qu'il nous faut pour progresser introduire les anticipations. Mais nous entrons ici dans des questions empiriques, numériques et théoriques particulièrement complexes. Elles bénéficient

heureusement d'une très vaste littérature. Mais le problème est alors de repérer dans cet ensemble quels sont les mécanismes les plus importants pour le cas d'espèce étudié. Il est en outre très important de faire le lien avec les aspects institutionnels, dans la mesure où les règles et institutions qui encadreront le marché des permis d'émissions négociables sont encore largement à écrire.

Si notre thèse s'inscrit directement dans le fil de la discussion sur la précaution, elle est restée en revanche plus éloignée du débat sur le développement durable. Nous avons certes travaillé sur la base d'un modèle de croissance, mais il nous manque encore deux éléments majeurs pour aller plus loin dans cette direction :

- En premier lieu, une ressource naturelle épuisable qui entrerait dans les fonctions de production. Ce point est critique dans la mesure où les énergies fossiles à l'origine de la majeure partie des émissions de CO₂ sont précisément des ressources épuisables (Krakauthamer, 1995). La tension entre substituabilité entre capital naturel et capital artificiel au sein de la fonction de production et progrès technique, tension qui est au cœur des distinctions entre soutenabilités faibles et fortes (Godard, 1994) pourrait ainsi être correctement traitée¹.
- En second lieu, le débat sur le développement durable porte sur la substituabilité entre consommation et environnement dans la fonction d'utilité des agents. Nous avons ici pris en compte l'environnement dans cette fonction d'utilité, mais uniquement *via* les pertes induites sur la consommation. Dès lors qu'il s'agit de représenter, comme au chapitre 4, la manière dont notre génération envisage les dommages du changement climatique sur les générations futures, ce choix nous apparaît légitime. Mais il est insuffisant pour réfléchir à la question de la monétarisation des impacts non marchands.

Ces développements possibles nous conduisent à mettre le point final à cette thèse en évoquant la question de la taille des modèles. En effet, les maquettes STARTS que nous avons développées dans cette thèse sont de petite taille et représentent le problème climatique en termes très agrégés. Nous avons démontré dans ce travail que, malgré leur simplicité, de tels outils sont susceptibles de fournir des informations qualitatives et des ordres de grandeur très utiles pour l'évaluation des politiques climatiques. Leur petite taille leur confère en outre des qualités précieuses pour être utilisés dans le débat. En effet, leurs hypothèses sont relativement peu nombreuses et transparentes. Les liens logiques entre leurs différentes composantes apparaissent donc d'autant plus clairement, ce qui rend ces objets *in fine* plus faciles à appréhender et à utiliser.

Mais si « *small is beautiful* », la demande sociale et les besoins de l'analyse nous obligent constamment à étendre le nombre de secteurs, à enrichir le jeu d'hypothèses, bref à complexifier les modèles. Pour s'en convaincre, le lecteur pourra simplement essayer d'imaginer la taille du modèle qui résulterait de la réalisation du programme de recherche que nous venons d'ébaucher. En présence d'incertitudes, il n'y a pas forcément d'approche meilleure qu'une autre, ni de taille « optimale » pour un modèle d'évaluation des politiques climatiques. Simplement, les questions auxquelles ces outils peuvent répondre, et le rôle qu'ils peuvent tenir dans le débat social sont différents. Toute la question est donc de savoir comment faire cohabiter ces différents types de modèles, et organiser le va-et-vient entre des maquettes très simples, de nature essentiellement démonstrative, comme STARTS, et des outils plus désagrégés susceptibles de répondre à des problèmes plus complexes. L'expérience montre qu'un tel dialogue n'est pas simple à organiser, mais qu'il constitue malgré tout un maillon essentiel dans le débat sur le changement climatique.

¹ La discussion sur l'actualisation que nous avons menée au chapitre 5 gagnerait à être complétée par une réflexion sur l'ordre optimal d'exploitation des ressources, dans l'esprit des travaux de Hotelling.

Bibliographie

Agarwal A., Narain S. [1991] "*Global warming in an unequal world*", Center for Science and Environment, New Delhi.

Agarwal A., Narain S. [1998] "*The atmospheric rights of all people on earth*", Center for Science and Environment Statement, New Delhi, disponible sur <http://www.oneworld.org/cse/html/cmp/cmp335.htm> (consulté le 6 janvier 2000), 4p.

Aghion P., Howitt P. [1998] "*Endogenous growth theory*", MIT Press, Cambridge, 694p.

AIE & OCDE (Agence Internationale de l'Energie et Organisation pour la Coopération et le Développement Economique) [1998] "*World Energy Outlook 1998*", AIE, Paris, 475p.

Alcamo J., Bouwman A., Edmonds J., Grübler A., Morita T., Sugandhy A. [1994] "An evaluation of the IPCC IS92 emission scenarios", in IPCC, *Radiative forcing of climate change and an evaluation of the IPCC IS92 emission scenarios* (Houghton J.T., Meira Filho L.G., Bruce J., Hoesung Lee, Callander B.A., Haites E., Harris N., Maskell K. eds.), Cambridge University Press, Cambridge, pp.247-304.

Alcamo J., Kreileman E. [1996] "Emission scenarios and global climate protection", *Global environmental change* 6(4), 305-334.

Alcamo J., Kreileman E., Leemans R. [1996] "Global models meet global policy: how can global and regional modellers connect with environmental policymakers? What has hindered them? What has helped?", *Global Environmental Change* 6(4), 255-269.

Alcamo J., Leemans R., Kreileman E. (eds.) [1998] "Global change scenarios of the 21st century: results from the IMAGE 2.1 model", Pergamon, Bithoven, 296p.

Allais M. [1953] "Le comportement de l'homme rationnel devant le risque : critique des postulats et des axiomes de l'école américaine", *Econometrica* 21(4), 504-546.

Arrhenius S. [1896] "On the influence of carbonic acid in the air upon the temperature of the ground", *Philosophical Magazine* 41 (n°237), disponible sur <http://maple.lemoyne.edu/~giunta/Arrhenius.html> (consulté le 21 février 2000).

Arrow K.J. [1951] "Mathematical models in social sciences", in Lasswell H.D. et Lerner D.T. (eds.), *Policy sciences in the United States*, Stanford University Press, Stanford, pp.129-154.

Arrow K.J. [1953] "Hurwicz's optimality criterion for decision-making under ignorance", *Technical report 6, Department of Economics and Statistics*, Stanford University.

Arrow K.J. [1962] "The economic implications of learning by doing", *Review of Economic Studies* 29(juin), 155-173.

Arrow K.J. [1971] "Exposition of the theory of choice under uncertainty", in McGuire C.B., Radner P. (eds.) *Decision and organization*, North-Holland, Amsterdam, pp.19-55, reproduit dans Arrow K.J. [1984] "*Collected papers of Kenneth J. Arrow - Volume 3 - Individual Choice under certainty and uncertainty*", The Belknap Press of Harvard University Press, Cambridge, pp.172-208.

Arrow K.J. [1982] "The rate of discount rate on public investments with imperfect capital markets", in Lind R.C. (ed.) *Discounting for time and risks in energy policy*, Ressources for the Future, Washington DC, pp.115-136.

Arrow K.J. [1995] "Effet de serre et actualisation", *Revue de l'Energie* n°471, 631-636.

Arrow K.J. [1999] "Discounting, morality and gaming", in Portney P.R., Weyant J.P. (eds.) *Discounting and intergenerational equity*, Ressources for the Future, Washington DC, pp.13-22.

Arrow K.-J., Cline W., Mäler K.-G., Munasinghe M., Squitieri R., Stiglitz R. [1996a] "Intertemporal Equity, Discounting, and Economic Efficiency", in Bruce J., Lee H., Haites E. (eds.) *Climate Change 1995: Economic and Social Dimensions of Climate Change* (Chapitre 4), Cambridge University Press, Cambridge, pp.129-144.

Arrow K.J., Fischer A.C. [1974] "Environmental preservation, uncertainty and irreversibility", *Quarterly Journal of Economics* 88(2), 312-319.

- Arrow K.J., Parikh J. Pillet G. [1996b] "Decision making framework for climate change", in Bruce J., Lee H., Haites E. (eds.) *Climate Change 1995: Economic and Social Dimensions of Climate Change* (chapitre 2), Cambridge University Press, Cambridge, pp.47-70.
- Arthur C.W. [1989] "Competing technologies, increasing returns and lock-in by historical trends", *Economic Journal* 99(1), 116-131.
- Aubin J.-P. [1997] *Dynamic economic theory: a viability approach*, Springer-Verlag, Berlin, 510p.
- Azar C. [1999] "Weight factors in cost-benefit analysis of climate change", *Environmental and Resource Economics* 13(3), 249-268.
- Azar C., Dowlatabadi A. [1999] "A review of technical change in assessment of climate policy", Document de travail Center for Integrated Study of the Human Dimensions of Climate Change, Université Carnegie Mellon, Pittsburgh, 34p.
- Azariadis C., Guesnerie R. [1986] "Sunspots and cycles", *Review of Economic Studies* 53(4), 725-737.
- Baron R. [1999] "The Kyoto mechanisms: how much flexibility do they provide?", in Baron R. et Bosi M. *Emission trading and the clean development mechanism: resource transfers, project costs and investment incentives*, Document de l'Agence Internationale de l'Energie à l'occasion de COP-5, Paris, pp.4-10.
- Becker G. [1999] "What price pollution? Leave that to a global market", *Business Week* (18 octobre), p.12.
- Beltratti A., Chichilnisky G., Heal G. [1996] "Sustainable Use of Renewable resources", Nota di Lavoro Fondazione Enrico Mattei n°70-96, 27p.
- Berk M., Den Elzen M., Metz B. [1999] "Global climate protection and equitable burden sharing – an exploration of some options", Communication au colloque EFIEA *Integrated climate policies in the European environment, costs and opportunities*, Milan, 4-6 mars, 19p.
- Bernstein P. M., Montgomery D. W., Rutherford T. F. [1999] "Global impacts of the Kyoto agreement: results from the MS-MRT model", communication au colloque *joint IEA/EMF/IEW meeting on Energy Modeling*, Paris, 16-18 juin, 56p.
- Berrah N.E. [1994] "Energie et développement : l'effet tunnel", *Revue de l'Energie* n°356, 409-415.
- Besset J.-P. [1997] "La Terre se réchauffe : les conséquences pour chaque continent", *Le Monde* daté du jeudi 27 novembre 1997, p.14.
- Birdsall N., Steer A. [1993] "Attaquons nous dès maintenant au réchauffement de la planète, mais sans truquer les chiffres", *Finance et Développement* 30(1), 7-9.
- Boiteux M. [1969] "Note sur le taux d'actualisation", *Revue d'Economie Politique* 79(1), 117-128.
- Bollen J., Manders T., Timmer H. [1999] "The IPCC SRES Stabilization scenarios", communication au colloque *joint IEA/EMF/IEW meeting on Energy Modeling*, Paris, 16-18 juin, 26p.
- Bovenberg L., Van der Mooij R. [1994] "Environmental levies and distortionary taxation", *American Economic Review* 84(6), 1085-1089.
- Bowen H.R. [1943] "The interpretation of voting in the allocation of economic resources", *Quarterly Journal of Economics* 58(1), 27-48.
- Boyer R., Juillard M. [1991] "The new endogenous growth theory versus a productivity regime approach: one century of american economic growth revisited", Communication à la *Conference URPE*, La Nouvelle Orléans, 3-5 janvier, 64p.
- Broecker W.S. [1997] "Thermohaline circulation, the Achilles heel of our climate system: will man-made CO₂ upset the current balance?", *Science* 278, 1582-1588.
- Broome J. [1992] *Counting the costs of global warming*, White Horse Press, Cambridge, 147p.
- Brown S. [1996] "Rôle actuel et futur des forêts dans le débat sur le changement climatique mondial", *Unasylva* 47(2), 3-10.
- Brown S., Sathaye J., Cannell M., Kauppi P. [1996] "Management of forests for mitigation of greenhouse gas emissions", in Watson R.T., Zinyowera M.C., Moss R.H. (eds.) *Climate change 1995: Impacts, adaptations and mitigation of climate change: scientific-technical analyses - contribution of WG II to the Second Assessment Report of the IPCC* (Chapitre 24), Cambridge University Press, Cambridge, pp. 773-792.

- Burniaux J.-M. [1998] "How important is market power in achieving Kyoto?: an assessment based on the GREEN model", Actes du colloque *Economic modelling of climate change*, OCDE, Paris, 17-18 septembre, pp.235-260.
- Burniaux J.-M. [1999] "Burden sharing rules in post-Kyoto strategies: a general equilibrium evaluation based on the GREEN model", communication au *joint IIASA, EMF, IEA Conference on Energy Modelling*, Paris, 16-18 juin, 23p.
- Burniaux J.-M., Nicoletti G., Oliveira-Martins J. [1992] "GREEN : un modèle global pour chiffrer les coûts des mesures de réduction des émissions de CO₂", *Revue Economique de l'OCDE* n°19, 55-99.
- Capros P. [1998] "Economic and energy system implications of European CO₂ mitigation strategy: synthesis of results from model based analysis", Actes du colloque *Economic modelling of climate change*, OCDE, Paris, 17-18 septembre, pp.27-48.
- Chao H.-P., Peck S. [2000] "Greenhouse gas abatement: how much? and who pays?", *Resource and Energy Economics* 22(1), 1-20.
- Chapuis T. [1996] "*Les problèmes de décision et le changement global : les leçons de la modélisation en économie de l'énergie*", Thèse de Doctorat en Sciences Economiques de l'EHESS, 366p.
- Chichilnisky G. [1982] "Social aggregation rules and continuity", *The Quarterly Journal of Economics* 96(2), 337-352.
- Chichilnisky G. [1996] "An axiomatic approach to sustainable development", *Social Choice and welfare* 13(2), 231-257.
- Chichilnisky G., Heal G. [1994] "Who should abate carbon emissions? An international viewpoint", *Economic Letters* 44(4), 443-449.
- Chichilnisky G., Heal G., Starrett D. [1993] "Equity and efficiency in international permit emission markets", Document de travail de l'université de Stanford.
- Chichilnisky G., Heal G., Starrett D. [1999] "Equity and efficiency in environmental markets: global trade in carbon emissions", à paraître dans Chichilnisky G. et Heal G. (eds.) *Environmental markets*, 19p.
- CIREN [1999] "*Critères d'évaluation comparative des politiques et mesures de réduction des émissions de gaz à effet de serre*", Rapport pour le Ministère d'Environnement, lettre de commande n°99-98, 65p.
- Cline W.R. [1992] "*The economics of global warming*", Institute for International Economics, Washington, DC, 400p.
- Cline W.R. [1993] "La lutte contre l'effet de serre", *Finance et Développement*, 30(1), 4-6.
- Colombier M. [1998] "*Critères de différenciation des engagements en matière d'émissions de gaz à effet de serre*", Etude pour la Mission Interministérielle à l'Effet de Serre, International Conseil Energie, Paris, 88p.
- Colombier M., Hourcade J.-C. [1989] "Développement de réseaux et modulations spatio temporelles des tarifs : l'équité territoriale revisitée", *Revue Economique* 40(4), 649-677.
- Commissariat Général au Plan [1998] "*Energie 2010-2020 : rapport de l'atelier « Trois scénarios énergétiques pour la France »*", Commissariat Général au Plan, Paris, 310 p.
- Costanza R., Daly H.E. [1987] "Towards an ecological economics", *Ecological Modelling* n°38, 1-7.
- Criqui P. [1996] "International markets and energy prices: the POLES model" in Lesourd J.B., Percebois J., Valette F. (eds.) *Models for energy policy*, Routledge, Londres, New York, pp.14-29.
- Criqui P., Cattier F., Kouvaritakis N. and Thonet, C. [1999] "*POLES: a world energy model developed in the framework of the EC-DGXII JOULE program: climate technology strategy within competitive energy markets towards new and sustainable growth*", disponible sur <ftp://iepe.upmf-grenoble.fr/pub/pole1.pdf> (consulté le 4 janvier 2000), 40p.
- Cropper M., Ayedede S.K., Portney P.R. [1994] "Preferences for life saving programs: how the public discounts time and age", *Journal of Risks and Uncertainty* Vol.8, 243-265.
- Cropper M., Laibson D. [1999] "The implications of hyperbolic discounting for project evaluation", in Portney P.R., Weyant J.P. (eds.) *Discounting and intergenerational equity*, Resources for the Future, Washington DC, pp.163-172.
- Culioli J.-C. [1994] "*Introduction à l'optimisation*", Ellipses, Paris, 316 p.

- Dasgupta P.S. [1974] "On some alternative criteria for justice between generations", *Journal of Public Economics* 3, 405-423.
- Dasgupta P.S., Heal G.M. [1979] *Economic theory and exhaustible resources*, Cambridge University Press, 501p.
- Dasgupta P.S., Mäler K.-G., Barrett S. [1999] "Intergenerational Equity, Social Discount Rates and Global Warming", in Portney P.R., Weyant J.P. (eds.) *Discounting and intergenerational equity*, Resources for the Future, Washington DC, pp.51-78.
- Dasgupta P.S., Sen A., Marglin S. [1972] *Guidelines for project evaluation*, Nations Unies, 383p.
- Debreu G. [1954] "Representation of a preference ordering by a numerical function", in Thrall R.M., Coombs C.H., Davis R.L. (eds.) *Decision Processes*, John Wiley and Sons, New York, pp.159-165, reproduit dans Debreu G. [1983] *Twenty papers of Gérard Debreu*, Econometric Society Monographs, Cambridge University Press, pp.105-110.
- Debreu G. [1959] "Topological methods in cardinal utility theory", in Arrow K.J., Karlin S., Suppes P. (eds.) *Mathematical methods in the social sciences*, Stanford University Press, pp.16-26 reproduit dans Debreu G. [1983] *Twenty papers of Gérard Debreu*, Econometric Society Monographs, Cambridge University Press, pp.120-132.
- Dessus B., Thomas J.-P., Tillerson K. [1999] "Le mécanisme de développement propre confronté aux priorités africaines", *Bulletin Africain* n°11, 11-24.
- Dessus G. [1949] "Les principes généraux de la tarification dans les services publics", présentation au *Congrès de l'Union Internationale des Producteurs et des Distributeurs d'Energie Electrique* (UNIPED), Bruxelles, 9-10 mai, reproduit dans Association Française de Cybernétique Economique et Technique (AFCET) [1971] *Vingt-cinq ans d'économie électrique : investissements, coûts marginaux et tarifs, études* (chapitre 13), Collection Monographies de Recherche Opérationnelle n°11, Paris, Dunod, 463p.
- Dobb M. [1972] "Economie du bien-être et économie socialiste", Calmann-Lévy, Paris, 314 p., traduit de l'anglais *Welfare economics and the economics of socialism*, Cambridge University Press (1969).
- Dowlatabadi H. [1999] "Integrated assessment: implications of uncertainty", communication au colloque *Uncertainty and climate assessment model*, EFIEA, Baden bei Wien, 10-18 juillet, 13p.
- Dowlatabadi H., Morgan G. [1993] "A model framework for integrated studies of the climate problem", *Energy Policy* 21(3), 209-221.
- Drèze J.H., Modigliani F. [1972] "Consumption decisions under uncertainty", *Journal of Economic Theory* Vol.5, 308-335.
- Edmonds J.A., Dooley J., Wise M. [1997] "The role of energy technology in atmospheric stabilization", Flannery B.P., Kohlhasse K.R., LeVine D.G. (eds.) *IPIECA symposium on critical issues in the economics of climate change*, IPIECA, Londres, pp.107-126.
- Edmonds J.A., Kim S.H., MacCracken C.N., Sands R.D., Wise M.A. [1997] *Return to 1990: The Cost of Mitigating United States Carbon Emissions in the Post-2000 Period*, Document de Travail Pacific Northwest National Laboratory, 15p.
- Edmonds J.A., Pitcher H., Barns, Baron R., Wise M. [1991] "Modeling future greenhouse gas emissions: the second generation model description", Communication à la conférence *Global Change and modeling*, Université des Nations Unies, Tokyo, Octobre, 55p.
- Ellerman D.A., Decaux A. [1998] "Analyzing post-Kyoto CO₂ emissions trading using marginal abatement curves", *MIT Global Change Joint Program Report* n°40, MIT, Boston, 32p.
- Enting I.G. [1995] "Analysing the conflicting requirements of the framework convention on climate change", *Climatic Change* n°31, 5-18.
- Fallot A. [1999] *Innovations dans le secteur énergétique sous contrainte d'objectifs publics : le cas de la biomasse*, Thèse de doctorat en Sciences Economiques de l'EHESS, 430p.
- Fankhauser S. [1995] *Valuing climate change – the economics of the greenhouse*, EarthScan, Londres, 180p.
- Faucheux S., Noël J.-F. [1985] *Economie des ressources naturelles et de l'environnement*, Armand Colin, Paris, 370p.

- Favereau O. [1991] "Irréversibilités et institutions : le problème micro-macro", in Boyer R., Chavance B., Godard O. (eds.) *Les figures de l'irréversibilité en économie*, Editions de l'EHESS, Paris, pp.69-96.
- Fischer-Vanden K., Edmonds J.A., Pritchett H.M., Barns D., Baron R., Kim S., MacCracken C.N., Malone E.L., Sands R.D., Wise M.A. [1993] "*The second generation model of energy use, the economy and greenhouse gas emissions*", Document de Travail Pacific Northwest Laboratory, Washington D.C., 18p.
- Foray D. [1989] "Les modèles de compétition technologique : une revue de la littérature", *Revue d'Economie Industrielle* n°48(2^{ème} trimestre), 16-34.
- Frankel J.A. [1998] "What kind of research on climate change economics would be of greatest use to policy-makers?", Actes du colloque *Economic modelling of climate change*, OCDE, Paris, 17-18 septembre, pp.1-6.
- G-77 & China [1998] "*Position paper of the group of 77 & China on the mechanism of the Kyoto protocol for the second meeting of the contact group on mechanism*", 2p.
- Gastaldo S. [1995] "Les bases de la théorie des biens collectifs et des effets externes", *Cours de microéconomie de l'environnement*, DEA EERN, non publié, 18p.
- Gerlagh R. [1999] "Discounting and sustainability in applied IAMs", Communication au colloque *Energy Modelling*, IEA, IIASA et EMF, Paris, 16-18 juin, 16p.
- Gielen D., Kram T. [1998] "The role of non-CO₂ greenhouse gases in meeting Kyoto targets", Actes du colloque *Economic modelling of climate change*, OCDE, Paris, 17-18 septembre, pp.221-233.
- Gjerde J., Grepperud S., Kverndokk S. [1999] "Optimal climate policy under the possibility of a catastrophe", *Resource and Energy Economics* 21(3/4), 289-317.
- Godard O. (ed.) [1997] "*Le principe de précaution dans la conduite des affaires humaines*", Editions de la Maison des Sciences de l'Homme et de l'INRA, Paris, 351p.
- Godard O. [1993] "Stratégies industrielles et conventions d'environnement : de l'univers stabilisé aux univers controversés", *INSEE - Environnement et économie*, Paris (Coll. "INSEE Méthodes" n°39-41), pp.145-174.
- Godard O. [1993] "Stratégies Industrielles et conventions d'environnement : de l'univers stabilisé aux univers controversés", in *INSEE - Méthodes* numéro spécial "Environnement et économie" (39/40), 145-174.
- Godard O. [1994] "Le développement durable : paysage intellectuel", *Natures-Sciences-Sociétés* 4(2), 309-321.
- Godard O. [1999] "Sur l'éthique, l'environnement et l'économie : la justification en question" à paraître dans Rotillon G. (ed.) *Développements récents en économie de l'environnement*, Editions Georg, Genève.
- Godard O., Hourcade J.-C. [1991] "Instruments for a collective management of climatic risk: a price-signal based framework", Actes du colloque *Climate change and ozone layer protection*, PNUD, Sophia Antipolis, 21-25 janvier, PNUD, Paris, pp.401-457.
- Gollier C., Jullien B., Treich N. [1997] "*Learning and irreversibility: an economic interpretation of the 'precautionary principle'*", Document de travail Université de Toulouse, 28 octobre, 24p.
- Goodin R.E. [1982] "Discounting discounting", *Journal of public policy* 2(1), 53-72.
- Goulder L.H. [1995] "Environmental Taxation and the Double Dividend: A reader's Guide", *International Tax and Public Finance* 2(2), 157-183.
- Goulder L.H., Schneider S.H. [1996] "*Induced technological change, crowding out, and the attractiveness of CO₂ emissions abatement*", Document de travail Université de Stanford, 36p.
- Grubb M. [1993] "Policy modelling for climate change: the missing models", *Energy Policy* 21(3), 203-208
- Grubb M., Chapuis T., Ha-Duong M. [1995] "The economics of changing course: Implications of adaptability and inertia for optimal climate policy", *Energy Policy* 23(4/5), 417-432.
- Grubb M., Vrolijk C., Brack D. [1999] "*The Kyoto protocol, a guide and an assessment*", Royal Institute of International Affairs, Londres, 342p.
- Grübler A., Gritsevskii A. [1997] "A model of endogenous technological change through uncertain returns on learning (R&D and investments)", Communication au colloque *Integrated Assessment of Carbon Emissions*, IEW and EMF, IIASA, Laxenburg, 23-25 juin, 43 p.
- Grübler A., Messner S., Nakićenović N., Strubegger M., Riahi K., Röhr A. [1998] "*Integrated assessment modelling of global environment policies and decision patterns*", Rapport au CNRS, contrat n°96-130 ECS, 51p.

- Guesnerie R. [1991] "Du bon usage de la formalisation en sciences sociales", *La Lettre du DELTA* (avril), 4-8.
- Guesnerie R. [1995] "The genealogy of modern theoretical public economics: from first best to second best", *European Economic Review* 39(3/4), 353-381.
- Guillaume M. [1971] "*Modèles économiques : méthodologie des modèles et techniques macroéconomiques*", Presses Universitaires de France, Paris, 313p.
- Ha-Duong M. [1998a] "*Comment tenir compte de l'irréversibilité dans l'évaluation intégrée du changement climatique ?*", thèse de doctorat de l'EHESS en Sciences Economiques, 256p.
- Ha-Duong M. [1998b] "Quasi-option value and climate policy choices", *Energy Economics* 20(5/6), 599-620.
- Ha-Duong M., Grubb M., Hourcade J.-C. [1997] "Influence of socioeconomic inertia and uncertainty on optimal CO₂-emission abatement", *Nature* 390, 270-273.
- Hammit J.K., Lempert J.R., Schlesinger M.E. [1992] "A sequential decision strategy for abating climate change", *Nature* 357, 315-318.
- Hanemann M.W. [1989] "Information and the concept of option value", *Journal of Environmental Economics and Climate Change* 16(1), 23-37.
- Harrod R.F. [1948] "*Towards a dynamic economics, some recent developments of economic theory and their application to policy*", Macmillan, Londres, 168 p.
- Heal G. [1997] "Discounting and climate change: an editorial comment", *Climatic Change* n°37, 335-343.
- Henderson N., Bateman I. [1995] "Empirical and public choice evidence for hyperbolic social discount rates and the implications for intergenerational discounting", *Environmental and Resource Economics* 5(4), 413-423.
- Henry C. [1974] "Investment decisions under uncertainty: the "irreversibility effect"", *American Economic Review* 64(6), 1006-1012.
- Henry C. [1984] "La microéconomie comme langage et enjeu de négociation", *Revue Economique* 35(1), 177-197.
- Henry C. [1997] "*Croissance et environnement : compatibilité entre le principe de justice distributive de John Rawls, croissance effective et actualisation*", Manuscrit Laboratoire Économétrie de l'Ecole Polytechnique, 40p.
- Holtmark B.J. [1998] "From the Kyoto protocol to the fossil fuel markets: an analysis of costs of implementation and gains from emission trading taking benefits from revenue cycling into account", Actes du colloque *Economic modelling of climate change*, OCDE, Paris, 17-18 septembre, pp.123-138.
- Hourcade J.-C. [1990a] "Calcul économique et construction sociale des irréversibilités : leçons de l'histoire énergétique récente", in Boyer R., Chavance B., Godard O. (eds.) *Les Figures de l'Irréversibilité en Économie*, Editions de l'EHESS, Paris, pp.279-310.
- Hourcade J.-C. [1990b] "*Les coefficients d'élasticité et leur domaine de pertinence pour la prévision énergétique : de l'élasticité « loi » à l'élasticité « mesure » des degrés de liberté*", Rapport de recherche pour le Commissariat Général au Plan n°90-2.18.00.67, CIRED, Montrouge, 36p.
- Hourcade J.-C. [1991] "Décision collectives sous controverses", *Projet* n°226, 74-83.
- Hourcade J.-C. [1993] "Modeling long-run scenarios: methodological lessons from a prospective study on a low CO₂ intensive country", *Energy Policy* 21(3), 309-324.
- Hourcade J.-C. [1994] "Economic issues and negotiation on global environment: some lessons from the recent experience on greenhouse effect", in Carraro C. (ed.) *Trade Innovation and Environment*, Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, pp.385-405.
- Hourcade J.-C. [1997] "Précaution et approche séquentielle de la décision face aux risques climatiques de l'effet de serre", in Godard O. (ed.) *Le principe de précaution dans la conduite des affaires humaines*, Editions de la Maison des Sciences de l'Homme et de l'INRA, Paris, pp.259-294.
- Hourcade J.-C. [1998] "Analyse économique, modélisation prospective et développement durable ou comment faire remonter des informations du futur ?", *Economies et Sociétés, Développement, Croissance et Progrès, Série F.*, n°36, 175-192.
- Hourcade J.-C. [1999] "Le climat du futur au risque de la négociation internationale" à paraître dans *Etudes*.

- Hourcade J.-C., Ben Chaabane N., Helioui K. [1992a] "*Système de taxation de l'énergie pour la prévention des risques d'environnement global : évaluation des coûts économiques à long terme*", Rapport de recherche pour le Centre de Prospective et d'Evaluation, CIRED, Montrouge, 71p.
- Hourcade J.-C., Chapuis T. [1995] "No regret potential and technical innovation: a viability approach to integrated assessment of climate policies", *Energy Policy* 23(4/5), 433-445.
- Hourcade J.-C., Halsnaes K., Jaccard M., Montgomery W.D., Richels R., Robinson J., Shukla P.R., Sturm P. [1996a] "A Review of Mitigation Cost Studies", in Bruce J., Lee H., Haites E. (eds.) *Climate Change 1995: Economic and Social Dimensions of Climate Change* (Chapitre 9), Cambridge University Press, Cambridge, pp.297-366.
- Hourcade J.-C., Hélioui K., Gherzi F. [1998] "Les déterminants du double-dividende d'écotaxes : changement technique et réduction du risque d'embauche en présence de rigidités du travail", Communication aux *Journées AFSE "Economie de l'environnement et des ressources naturelles"*, Toulouse, 11-12 mai, 32p.
- Hourcade J.-C., Kostopoulou M. [1994] "Quelles politiques face aux chocs énergétiques : France, Italie, Japon, RFA : quatre modes de résorption des déséquilibres", *Futuribles* n°189, 7-27.
- Hourcade J.-C., Lecocq F. [1997] "Représentation du temps, « timing » de l'action et valorisation de l'environnement : quelques réflexions à partir du cas de l'effet de serre", Actes du Colloque *les temps de l'environnement* (volume 1), GEODE, CNRS, Toulouse, 5-7 novembre, pp.281-289.
- Hourcade J.-C., Lecocq F. [1999] "Equity in climate negotiations: an engineer economist viewpoint", Communication au colloque *IPCC Workshop on equity*, Colombo, 24-26 avril, 18p.
- Hourcade J.-C., Lecocq F., Chaabane N. [1996b] "Costs of inertia, nature and timing of decisions: some lessons from numerical experiments with STARTS", Communication au colloque *Energy Modelling*, IIASA, IEA, IEW, Paris, 16-18 juin, 16p.
- Hourcade J.-C., Lecocq F., Ha-Duong M. [1997] "Optimization models within a sequential decision making framework: a tool for hierarchizing uncertainties - two examples from the climate change issue", Communication au colloque *Optimization Days*, GERAD, Université de Montréal, Montréal, 12-14 mai, 15p.
- Hourcade J.-C., Richels R., Robinson J. (convening and principal lead authors) [1996c] "Estimating the costs of mitigating greenhouse gases", in Bruce J., Lee H., Haites E. (eds.) *Climate Change 1995: Economic and Social Dimensions of Climate Change* (Chapitre 8), Cambridge University Press, Cambridge, pp.263-296.
- Hourcade J.-C., Salles J.-M., Thery D. [1992b] "Ecological economics and scientific controversies: lessons from some recent policy making in the EEC", *Ecological Economics* 6(3), 211-233.
- Howarth R., Norgaard R. [1993] "Intergenerational transfers and the social discount rate", *Environmental and Resource Economics* 3(4), 337-358.
- Hurwicz L. [1951] "Optimal criteria for decision-making under ignorance", *Cowles Commission Discussion Paper* n°370.
- IAT (Interagency Analytical Team) [1997] "*Economic Effects of Global Climate Change Policies*", Washington, 44p.
- IIASA & WEC (International Institute for Applied Systems Analysis et World Energy Council) [1995] *Global energy perspectives to 2050 and beyond*, IIASA, Laxenburg, 110p.
- IPCC [1990] "*Climate Change, the scientific assessment*" (Houghton J.T., Jenkins G.J., Ephraums J.J., eds.), WMO/UNEP, Cambridge University Press, Cambridge, 365p.
- IPCC [1994] "*Radiative forcing of climate change and an evaluation of the IPCC IS92 emission scenarios*" (Houghton J.T., Meira Filho L.G., Bruce J., Hoesung Lee, Callander B.A., Haites E., Harris N., Maskell K. eds.) Cambridge University Press, Cambridge, 339p.
- IPCC [1996] "*Deuxième rapport d'évaluation du GIEC – Résumé à l'attention des décideurs*", PNUE, OMM, 63p.
- IPCC [1997] "*Stabilization of atmospheric greenhouse gases : physical, biological and socio-economic implications*", Papier Technique du GIEC n°3, Cambridge University Press, Cambridge, 45p.
- Jaccard M. [1997] "*Heterogenous capital stock and decarbonating the atmosphere: does delay make cents?*", Document de travail Université Simon Fraser, 26p.
- Jacoby H.D., Prinn R.G., Schmalensee R. [1998] "Kyoto's unfinished business", *Foreign Affairs* 77(4), 54-66.

- Jacoby H.D., Schlamensee R., Wing I. S. [1999] "Towards a useful architecture for Climate Change negotiations", *MIT Global Change Joint Program Report n°49*, MIT, Boston, 24p.
- Jäger J. [1998] "Current thinking on using scientific findings in environmental policy making", *Environmental Modeling and Assessment* 3(3), 143-153.
- Jeanneney J.-M. [1989] "Du bon usage des modèles", *Observations et Diagnostics Economiques* 28, 2-5.
- Joos F., Müller-Fürstenberg G., Stephan G. [1999] "Correcting the carbon cycle: how important is it for the economics of climate change?", *Environmental Modeling and Assessment* 4(2/3), 133-140.
- Kamien M.I., Schwartz N.L. [1991] "Dynamic optimization: the calculus of variations and optimal control in economics and management", *Série Advanced Textbooks in economics* Vol.31, Elsevier, New York, 377p.
- Kann A. [1998] "A comparison of approaches for performing uncertainty analysis in integrated assessment models", *Energy Modeling Forum Working Paper 14.4*, 29p.
- Karni E. Schmeidler D. [1991] "Utility theory with uncertainty", in Hildenbrand W. et Sonnenschein H. (eds.) *Handbook of mathematical economics* (chapitre 33), Elsevier Science Publishers, Amsterdam, pp.1763-1831.
- Katz M., Shapiro C. [1985] "Technology adoption in the presence of network externalities", *Journal of Political Economy* 94(4), 822-841.
- Keeling, C.D., Whorf T.P. [1999] "Atmospheric CO₂ records from sites in the SIO air sampling network", in *Trends: A Compendium of Data on Global Change*, Carbon Dioxide Information Analysis Center, Oak Ridge National Laboratory, U.S. Department of Energy, disponible sur <http://cdiac.esd.ornl.gov/> (consulté le 20 février 2000).
- Kennedy D., Hinchy M., Fisher B. [1997] "Effects of greenhouse gas abatement in OECD countries on developing countries", in Flannery B.P., Kohlhase K.R., LeVine D.G. (eds.) *IPIECA symposium on critical issues in the economics of climate change*, IPIECA, Londres, pp.211-224.
- Kimball M.S. [1990] "Precautionary saving in the small and in the large", *Econometrica* 58(1), 53-73.
- Knight F.H. [1921] *Risk, uncertainty and profit*, Houghton Mifflin, Boston, 381p.
- Kolstad C.D. [1996] "Fundamental irreversibilities in stock externalities", *Journal of Public Economics*, 60(2), 221-233.
- Koopmans T.C. [1960] "Stationary ordinal utility and impatience", *Econometrica* 28(2), 287-309.
- Koopmans T.C. [1965] "On the concept of optimal economic growth", *Pontificiae Academiae Scientiarum Scripta Varia*, 28, Actes de la semaine d'étude sur l'analyse économétrique dans la formulation des plans de développement, Cité du Vatican, pp.225-300.
- Koopmans T.C. [1968] "Intertemporal Distribution and 'Optimal' Aggregate Economic Growth" in Fellner W. (ed.) *Ten Economic Studies in the Tradition of Irving Fisher*, John Wiley, pp.95-126.
- Koopmans T.C., Diamond P.A., Williamson R.E. [1964] "Stationary utility and time perspective", *Econometrica* 32(1/2), 82-100.
- Krass D., Filar J.A., Sagnik S. [1992] "A weighted markov-decision process", *Operations Research* 40(6), 1180-1187.
- Krautkraemer J.A. [1998] "Nonrenewable resource scarcity", *Journal of Economic Literature* 36(décembre), 2065-2107.
- Kreps D.M. [1979] "A representation theorem for "preference for flexibility"", *Econometrica* 47(3), 565-577.
- Kreps D.M., Porteus E.L. [1978] "Temporal resolution of uncertainty and dynamic choice theory", *Econometrica* 46(1), 185-200.
- Kreps D.M., Porteus E.L. [1979a] "Temporal Von Neumann-Morgenstern and induced preferences", *Journal of Economic Theory* Vol.20, 81-109.
- Kreps D.M., Porteus E.L. [1979b] "Dynamic choice theory and dynamic programming", *Econometrica* 47(1), 91-100.
- Krugman P. [1991] "History versus expectations", *Quarterly Journal of Economics* 105(2), 651-667.
- Krugman P. [1993] "First nature, second nature, and metropolitan location", *Journal of Regional Science* 33(2), 129-144.

- Krugman P. [1998] "Two cheers for formalism", *Economic Journal* 108(novembre), 1829-1836
- Kverndokk S. [1995] "Tradeable CO₂ emission permits: initial distribution as a justice problem", *Environmental Values* 4(2), 129-148.
- Laffont J.J. [1985] "*Cours de théorie microéconomique - Tome 2 : Economie de l'incertain et de l'information*", Collection économie et statistiques avancées, série École nationale de la statistique et de l'administration économique et Centre d'études des programmes économiques, Economica, Paris, 201p.
- Lave L.B. [1991] "Formulating greenhouse policies in a sea of uncertainties", *Energy Journal* 12(1), 9-21.
- Le Pesant T. [1997] "Modélisation, permis d'émissions négociables et régime de coordination internationale sur l'effet de serre", Mémoire de DEA Economie de l'Environnement et des Ressources Naturelles, Paris X Nanterre, EHESS, ENGREF, INAPG, 94p.
- Lebaube A. [2000] "Retraites : sortir du débat statistique", *Le Monde* daté du vendredi 18 février, p.1.
- Lecocq F. [1996] "*Taux d'actualisation, acceptabilité et « timing » de l'action*", Mémoire de DEA Economie de l'Environnement et des Ressources Naturelles, Paris X Nanterre, EHESS, ENGREF, INAPG, 100p.
- Lecocq F., Hourcade J.-C. [1997] "Timing of Climate Policies: the interplay between valuing the future and beliefs in the damage curve shape", communication au colloque *Integrated Assessment of Carbon Emissions, IEW and EMF*, IIASA, Laxenburg, 23-25 juin, 17p.
- Lecocq F., Hourcade J.-C., Ha-Duong M. [1998] "Decision making under uncertainty and inertia constraints: sectoral implications of the when flexibility", *Energy Economics* 20(5/6), 539-555.
- Lecocq F., Hourcade J.-C., Le Pesant T. [1999] "Equity, uncertainties and the robustness of entitlement rules", communication au *joint IIASA, EMF, IEA Conference on Energy Modeling*, Paris, 16-18 juin, 37p.
- Leggett J., Pepper W.J., Swart R.J., Edmonds J.A., Meira Filho L.G., Mintzer I., Wang M.-X., Wasson J. [1992] "Emission scenarios for IPCC: an update", in Houghton J.T., Callander B.A.A., Varney S.K. (eds.) *Climate change 1992: the supplementary report to the IPCC scientific assessment*, Cambridge University Press, Cambridge, pp.69-96.
- Lind R.C. [1982] "*Discounting for time and risks in energy policy*", Resources for the Future, Washington DC, 468p.
- Lind R.C. [1995] "Intergenerational equity, discounting and the role of cost benefit analysis in evaluating global climate policy", *Energy Policy* 23(4-5), 379-389.
- Lindhal E. [1919] "Just taxation, a positive solution", in Musgrave R.A., Peacock A.T. (eds.) *Classics in the theory of public finance*, St Martin's, New York, pp.165-200.
- Locatelli B. [1996] "*Forêts tropicales et cycle du carbone*", Collection Repère, CIRAD, Montpellier, 91p.
- Loewenstein G., Prelec D. [1992] "Anomalies in intertemporal choice: evidence and an interpretation", *Quarterly Journal of Economics* 106(2), 181-193.
- Loewenstein G., Thaler R.H. [1989] "Anomalies in temporal choice", *Journal of Economic Perspectives* 3(4), 181-193.
- Loulou R., Kanudia A. [1997] "*Minimax regret strategies for greenhouse gas abatement: methodology and application*", Discussion Paper GERAD G-97-32, Montréal, 9p.
- Loulou R., Shukla P.R., Kanudia A. [1997] "*Energy and environment policies for a sustainable future*", Allied Publishers Limited, New Delhi, 159p.
- Luce R.D., Raiffa H. [1957] "*Games and décisions: introduction and critical survey*", Dover Publications, New York, 509p.
- Lutz W., Sanderson W., Scherbov S., Goujon A. [1996] "World population scenarios for the 21st century", in Lutz W. (ed.) *The future population of the world: what can we assume today?*, IIASA, EarthScan Publications, Londres, pp.361-396.
- Machina M.J. [1989] "Dynamic consistency and non-expected utility models", *Journal of Economic Literature*, 27(décembre), 1622-1668.
- Maddison A. [1995] "*Monitoring the world economy in the 20th century 1820-1992*", OECD Development Center Studies, OCDE, Paris,

- Manne A. [1988] "*Ramsey model of optimal economic growth*", Department of Operation Research, Stanford University, disponible sur <http://www.gams.com/modlib/libtxt/ramsey.txt> (consulté le 26 décembre 1999).
- Manne A. [1995] "The rate of time preference: implications for the greenhouse debate", *Energy Policy* 23(4/5), 391-394.
- Manne A. [1999a] "Equity, efficiency and discounting", in Portney P.R., Weyant J.P. (eds.) *Discounting and intergenerational equity*, Resources for the Future, Washington DC, pp.111-130.
- Manne A. [1999b] "International carbon agreements, EIS trade and leakage", communication au *joint IEA/EMF/IEW meeting*, Paris, 16-18 juin, 8p.
- Manne A., Richels R. [1992] "*Buying greenhouse insurance: the economic costs of carbon dioxide emission limits*", MIT Press, Cambridge, 182p.
- Manne A., Richels R. [1994] "The cost of stabilizing global CO₂ emissions: a probabilistic analysis based on expert judgements", *Energy Journal* 15(1), 31-56.
- Manne A., Richels R. [1995] "The greenhouse debate: economic efficiency, burden sharing and hedging strategies", *Energy Journal* 16(4), 1-37.
- Manne A., Richels R. [1997] "The greenhouse debate: economic efficiency, burden sharing and hedging strategies" in Flannery B.P., Kohlhase K.R., LeVine D.G.) *IPIECA symposium on critical issues in the economics of climate change*, IPIECA, Londres, pp.81-106.
- Marland G., Boden T. [1999] "*Kyoto related fossil-fuel CO₂ emissions totals*", disponible sur <http://cdiac.esd.ornl.gov/trends/emis/> (consulté le 12 novembre 1999).
- Marland G., Boden T., Brenkert A., Andres B., Johnston C. [1999] "*Regional CO₂ emissions from fossil-fuel burning, cement manufacture and gas flaring, 1751-1996*", disponible sur <http://cdiac.esd.ornl.gov/ftp/ndp030/region96.ems> (consulté le 12 novembre 1999).
- Martin Y. [1997] "Notre mobilité est-elle durable ?", *La Jaune et la Rouge* n°523, 4-8.
- Martin Y. [1998] "*Fiscalité, subventions et évolution de l'urbanisme*", document de travail, 3p.
- Martin Y. [1999] "Transports et développement durable", Conférence au DEA EERN, 30 mars.
- Massé P. [1965] "*Le plan ou l'anti-hasard*", Gallimard, Paris, 255p.
- Mathy S., de Gouvello C. [1999] "Mécanisme de Développement Propre : Flexibilité pour les engagements de réductions des émissions des Pays de l'Annexe1 ou levier pour le développement des Pays en Développement", Communication aux *Journées Economie de l'Environnement du PIREE - CNRS* ", Strasbourg, 2-3 décembre, 29p.
- McKibbin W.J., Shackleton R., Wilcoxon P.J. [1998] "The potential effects of international carbon emission permit trading under the Kyoto protocol", Actes du colloque *Economic modelling of climate change*, OCDE, Paris, 17-18 septembre, pp.49-80.
- Meadows D.H., Meadows D.L., Randers J., Behrens W.W. [1972] "*The limits to growth: a report for the Club of Rome's project on the predicament of mankind*", Universe Books, New York, 205p.
- Mendelsohn R., Schlesinger M.E. [1999] "Climate-response functions", *Ambio* 28(4), 362-366.
- Mermet L., Hordijk L. [1989] "On getting simulation models used in international negotiations: a debriefing exercise", in Mautner-Mackelhof M. (ed.) *Processes of international negotiations*, West Vien Press, Vienne, 427-448.
- Mermet L., Piveteau V. [1997] "Pratiques et méthodes prospectives : quelle place pour les recherches sur l'environnement ?", in Actes du Colloque *les temps de l'environnement*, GEODE, CNRS, Toulouse, 5-7 novembre, pp.327-335.
- Messner et Stuegger [1995] "User's guide for MESSAGE III", *Document de travail IIASA WP-95-069*, IIASA, Laxenburg, 67p.
- Milnor J.W. [1954] "Games against nature", in Thrall R.M., Coombs C.H., Davis R.L. (eds.) *Decision Processes*, John Wiley and Sons, New York, pp.49-60.
- Mohr E. [1995] "Greenhouse Policy persuasion: towards a positive theory of discounting the climate futur", *Ecological Economics* 15(3), 235-245.

- Morita T., Lee H.-S. [1997] "Emission scenario database prepared for IPCC Special Report on Emission Scenarios", disponible sur <http://sres.ciesin.org/index.html> (consulté le 6 janvier 2000).
- Morita T., Matsuoka Y., Jiang K., Masui T., Takahashi K., Kainuma M., Pandey R. [1998] "SRES IS98A1 marker scenario", disponible sur <http://www.sres.ciesin.org> (consulté le 15 janvier 1999).
- Mortier F. [1995] "Le CO₂ et la forêt", *Bulletin technique de l'ONF N°29*, ONF, Paris, 160p.
- Moulton R.J., Richards K.R. [1990] "Costs of sequestering carbon through tree planting in the United States", *G-Technical Report WO-58*, US Department of Agriculture, Forest Service, 35p.
- Nakićenović N. [1997] "Technological substitution and long waves in the USA", in Vasko T. (ed.) *The long-wave debate*, Springer-Verlag, Berlin, pp.76-104.
- Nakićenović N., Grübler A., Mc Donald A. (eds.) [1998] "Global energy perspectives", IIASA - WEC, Cambridge University Press, Cambridge, 300p.
- Neftel, A., Friedli H., Moor E., Lötscher H., Oeschger H., Siegenthaler U., Stauffer B. [1994] "Historical CO₂ record from the Siple Station ice core", in *Trends: A Compendium of Data on Global Change*, Carbon Dioxide Information Analysis Center, Oak Ridge National Laboratory, U.S. Department of Energy, disponible sur <http://cdiac.esd.ornl.gov/> (consulté le 20 février 2000).
- Negishi T. [1960] "Welfare economics and existence of an equilibrium for a competitive economy", *Metroeconomica* Vol.12, 92-97.
- Newell R., Pizer W. [1998] "Regulating stock externalities under uncertainties", *Discussion Paper 99-10*, Resources for the Future, Washington DC, 29p.
- Newell R.G., Jaffe A.B., Stavins R.N. [1999] "The induced innovation hypothesis and energy saving technological change", *The Quarterly Journal of Economics* 113(août), 941-975.
- Nicholls R.J., Hoozemans F.M.J., Marchand M. [1999] "Increasing flood risk and wetland losses due to global sea-level rise: regional and global analyses", *Global Environmental Change* 9 (supplementary issue), S69-S88.
- Nordhaus W.D. [1991] "To slow or not to slow: the economics of the greenhouse effect", *Economic Journal* 101(juillet), 920-937.
- Nordhaus W.D. [1992a] "The 'DICE' model: background and structure of a Dynamic Integrated Climate-Economy model of global warming", *Cowles Foundation Discussion Paper No.1009*, Yale University, 102p.
- Nordhaus W.D. [1992b] "An optimal transition path for controlling greenhouse gases", *Science* 258, 1315-1318.
- Nordhaus W.D. [1999a] "Biens publics globaux et changement climatique", *Conférence annuelle de l'Institut d'Economie Industrielle*, Toulouse, 14 juin, 17p.
- Nordhaus W.D. [1999b] "Discounting and public policies that affect the distant future", in Portney P.R., Weyant J.P. (eds.) *Discounting and intergenerational equity*, Resources for the Future, Washington DC, pp.145-162.
- Nordhaus W.D., Yang Z. [1996] "A regional dynamic general-equilibrium model of alternative climate-change strategies", *American Economic Review* 86(4), 741-765.
- Oliveira Martins J., Sturm P. [1996] "Efficiency and distribution in computable models of carbon emission trading", Communication au *Colloque Annuel de l'American Economic Association*, San-Francisco, 5-7 janvier, 11p.
- Onigkeit J., Alcamo J. [1999] "A different perspective for global climate policy: combining burden sharing and climate protection", communication au colloque *Uncertainty and climate assessment model*, EFIEA, Baden bei Wien, 10-18 juillet, 10p.
- ONU [1992] "Convention Cadre des Nations Unies sur le Changement Climatique", ONU.
- Parry M., Rosenzweig C., Iglesias A., Fischer G., Livermore M. [1999] "Climate change and the world food security: a new assessment", *Global Environmental Change* Vol.9 (supplementary issue), S51-S67.
- Pearce D.W., Cline W.R., Achanta A.N., Fankhauser S., Pachauri R.K., Tol R.S.J., Vellinga P. [1996] "The social costs of climate change: greenhouse damage and benefits of control", in Bruce J.P., Lee H., Haites E.F. (eds.), *Climate change 1995: Economic and social dimensions of climate change* (chapitre 6), Cambridge University Press, pp.178-224.
- Pearce D.W., Turner R.K. [1990] "Economics of natural resources and the environment", Harvester Wheatsheaf, Londres, 378p.

- Phelps E.S, Pollak R.A. [1968] "On second best national saving and game equilibrium theory", *Review of Economic Studies* 35(2), 185-199.
- Philibert C. [1997] "*La préférence pure pour le présent et le changement climatique*", Miméo ADEME, 17p.
- Pigou A.C. [1920] "*The economics of welfare*" (1^{ère} édition), MacMillan, Londres, 976p.
- Pindyck R.S. [1991] "Irreversibility, uncertainty, and investment", *Journal of Economic Literature* 29(septembre), 1110-1148.
- Pizer W. [1997] "Prices vs Quantities revisited: the case of Climate Change", *RFF Discussion Paper 98-02*, October 1997, Resources for the future, Washington DC, 48p.
- Portney P.R., Weyant J.P. (eds.) [1999] "*Discounting and intergenerational equity*", Resources for the Future, Washington DC, 186p.
- Prinn R.G., Jacoby H.D., Sokolov A.P., Wang C., Xiao X., Yang Z., Eckaus R., Stone P.H., Ellerman A.D., Melillo J., Fitzmaurice J., Kicklighter D., Liu Y., Holian G. [1998] "Integrated global system model for climate policy assessment: feedbacks and sensitivity studies", *MIT Global Change Joint Program Report n°36*, MIT, Boston, 73p.
- Rabl A. [1995] "Discounting of Long Term Costs: What would future generations prefer us to do ?", *Ecological Economics* 17(3), 137-145.
- Ramsey F. [1928] "A Mathematical Theory of Saving", *Economic Journal* 38(décembre), 543-559.
- Rawls J. [1971] "*A theory of justice*", The Belknap Press of Harvard University Press, Cambridge, 607p.
- Reilly J., Prinn R.G., Harnish J., Fitzmaurice J., Jacoby H.D., Kicklighter D., Melillo J., Stone P.H., Sokolov A.P., Wang C. [1999] "Multi-gas assessment of the Kyoto Protocol", *Nature* 401, 549-555.
- Repetto R. [1993] "Government policy, economics and the forest sector", in Kilaparti R. et Woodward G.M. *World forests for the future*, Yale University Press, New Haven, pp.93-110.
- Repetto R., Gillis M. [1988] "*Public policies and the misuse of forest resources*", World Resources Institute, Cambridge University Press, 432p.
- Riahi K., Roehrl A. [1998] "*SRES IS98 B2 marker scenario*", disponible sur <http://www.sres.ciesin.org> (consulté le 15 janvier 1999).
- Richards K.R. [1995] "*The time value of carbon in bottom-up studies*", Document de travail Battelle Laboratories, 11p.
- Ridgley M.A. [1996] "Fair sharing of greenhouse gas burdens", *Energy Policy* 24(6), 517-529.
- Robalino D.A., Lempert R.J. [1998] "*Carrots and sticks for new technology: crafting greenhouse gas reduction policies for a heterogeneous and uncertain world*", Document de Travail RAND Corporation, 44p.
- Robbins L. [1938] "Interpersonal comparisons of utility", *Economic Journal* 48(décembre), 635-641.
- Romm J., Rosenfeld A., Herrman S. [1999] "*The internet economy and global warming: a scenario of the impact of the e-commerce on energy and the environment*", Document de travail Global Environment and Technology Foundation, 79p.
- Roqueplo P. [1988] "Expertise scientifique : le cas des pluies acides", *Recherche* n°205.
- Rose A., Stevens B., Emonds J., Wise M. [1998] "International equity and differentiation in global warming policy", *Environment and Resource Economics* 12(1), 25-51.
- Rotmans J. [1998] "Methods for Integrated Assessment: the challenges and opportunities ahead", *Environmental Modeling and Assessment* 3(3), 155-179.
- Rotmans J. De Vries B. (eds.) [1997] "*Perspectives on global change, the TARGETS approach*", Cambridge University Press, Cambridge, 463p.
- Ryder H.E., Heal G. [1973] "Optimal growth with intertemporally dependent preferences", *Review of Economic Studies* 40(1), 1-31.
- Sachs I. (ed.) [1972] "*Political economy of environment – problems of method*", Papiers présentés au symposium sur l'économie politique de l'environnement, Maison des Sciences de l'Homme, Paris, 5-8 juillet 1971, Mouton, Paris, La Hague, 237p.

- Samuelson P.A. [1954] "The pure theory of public expenditure", *The Review of Economics and Statistics* Vol.36, 387-389.
- Savage L.J. [1951] "The theory of statistical decision", *Journal of the American Statistical Association* 46(1), 55-67.
- Savage L.J. [1954] *The foundations of statistics* (seconde édition révisée, 1972), Dover Publications, New York, 376p.
- Schelling T. [1995] "Intergenerational discounting", *Energy Policy* 23(4/5), 395-401.
- Schipper L., Unander F., Lilliu-Marie C. [1999] "One man's meat is another's carbon: differences in carbon emissions among industrialised countries", communication au *joint IIASA, EMF, IEA Conference on Energy Modelling*, Paris, 16-18 juin, 25p.
- Scimemi G. [1987] "Environmental policies and anticipatory strategies", in Simonis C.E. (ed.) *Preventive environmental policy*, Campus, New York, 32p.
- Sedjo R., Sohngen B., Jagger P. [1998] "Carbon sinks in a post-Kyoto world", disponible sur <http://www.weathervane.rff.orf/features/feature050.html> (consulté le 5 octobre 1998).
- Sedjo R., Wisniewski J., Sample A., Kinsman J. [1995] "The economics of managing carbon via forestry: Assessment of existing studies", *Environmental and Resource Economics* 6(2), 139-165.
- Sen A.K. [1967] "Isolation, assurance and the social rate of discount", *Quarterly Journal of Economics* 81(1), 112-124.
- Sen A.K. [1987] *On ethics and economics*, Blackwell Publishers, Oxford, traduit en français sous le titre «Ethique et économie» in Sen A.K. [1993] *Ethique et économie et autres essais*, PUF, Paris, pp.4-83.
- Sénat des Etats-Unis d'Amérique [1997] "Senate Resolution 98", 12 juin.
- Shukla P.R. [1996] "When and where aspects of climate change mitigation actions: a developing country perspective", communication au symposium *IPCC Lessons from the IPCC as an integrated assessment process*, Toulouse, 24-26 octobre, 17p.
- Shukla P.R. [1998] "Justice, equity and efficiency in climate change: a developing country perspective", à paraître in Toth F. (ed.) *Fairness concerns in climate change*.
- Solow R.M. [1956] "A contribution to the theory of economic growth", *Quarterly Journal of Economics* 70(1), 65-94.
- Solow R.M. [1988] "Growth theory and after", *American Economic Review* 78(3), 307-317.
- Solow R.M. [1992] "An almost practical step towards sustainability", *Conférence à l'occasion du 40^{ème} anniversaire de Resources for the Future*, 8 octobre, 22p.
- Solow R.M. [1999] "Foreword", in Portney P.R., Weyant J.P. (eds.) *Discounting and intergenerational equity*, Resources for the Future, Washington DC, pp.vii-ix.
- Spence M., Zeckhauser R. [1972] "The effect of the timing of consumption decisions and the resolution of lotteries on the choice of lotteries", *Econometrica* 40(2), 401-403.
- SRES [1999a] "Model description", disponible sur http://sres.ciesin.org/htmls/Model_Descriptions.html (consulté le 16 novembre 1999).
- SRES [1999b] "SRES Modeling results", disponible sur http://sres.ciesin.org/htmls/data_tabl_All.html (consulté le 9 février 2000).
- Stein G., Wagner H.-F. (eds.) [1999] *Das IKARUS-Projekt: Klimaschutz in Deutschland. Strategien für 2000-2020*, Springer, Berlin.
- Stephan G., Müller-Fürstenberger G. [1997] "Global warming and the economic costs of altruism: a numerical thought experiment", Document de travail IIASA, 11p.
- Stephan G., Müller-Fürstenberger G., Predivoli P. [1997] "Overlapping generations or infinitely lived agents", *Environmental and Resource Economics* 10(1), 27-40.
- Stiglitz J.E. [1982] "The rate of discount for benefit-cost analysis and the theory of the second best", in Lind R.C. (ed.) *Discounting for time and risks in energy policy*, Ressources for the Future, Washington DC, pp.151-204.

- Stiglitz J.E. [1998] "Distinguished lecture on economics in government: the private uses of public interests: incentives and institutions", *Journal of Economic Perspectives* 12(2), 3-22.
- Stoleru L. [1973] "*L'équilibre et la croissance économique : Principes de macroéconomie*", Dunod, Paris (3^{ème} édition), 640 p.
- Svirezhev Y., Brovkin V., von Bloh W., Schellnhuber H.J., Petschel-Held G. [1999] "Optimisation of reduction of global CO₂ emission based on a simple model of the carbon cycle", *Environmental Modeling and Assessment* 4(1), 23-33.
- Swart R., Berk M., Janssen M., Kreileman E., Leemans R. [1998] "The safe landing approach: risks and trade-offs in climate change", in Alcamo J., Leemans R., Kreileman E. (eds.) *Global change scenarios of the 21st century: results from the IMAGE 2.1 model*, Pergamon, Elsevier, Oxford, pp.193-218.
- Théry D. [1997] "Experts et négociation climat : « relecture attentiste » du cycle du carbone et modélisation intégrée (1990-1996)", in Actes du Colloque *les temps de l'environnement*, GEODE, CNRS, Toulouse, 5-7 novembre, pp.373-381.
- Tol R.S.J. [1994] "The damages costs of climate change: a note on the tangibles and intangibles, applied to DICE", *Energy Policy* 22(5), 436-438.
- Tol R.S.J. [1995] "The damage costs of climate change: towards more comprehensive calculations", *Environmental and Resource Economics* 5(4), 353-374.
- Tol R.S.J. [1999a] "*New estimates of the damage costs of climate change – part 1: benchmark estimates*", Document de travail Université de Vrije D99-01, Amsterdam, 29p.
- Tol R.S.J. [1999b] "*New estimates of the damage costs of climate change – part 1: dynamic estimates*", Document de travail Université de Vrije D99-02, Amsterdam, 37p.
- Tol R.S.J., Fankhauser S. [1998] "*On the representation of impacts in integrated assessment models of climate change*", *Environmental Modeling and Assessment* 3(1/2), 63-74.
- Tol, R.S.J. [1998] "Short term decisions under long term uncertainty", *Energy Economics* 20(5/6), 557-569.
- Toth F.L. [1995] "Discounting in integrated assessment of climate change", *Energy Policy* 23(4/5), 403-409.
- Toth F.L. [1999] "Intergenerational equity and discounting", Communication au colloque groupe de travail EFIEA sur les politiques climatiques *Integrating climate policies in the european environment - costs and opportunities*, Milan, 4-6 mars, 15p.
- Toth F.L., Bruckner T., Fussel H.-M., Leimbach M., Petscheld-Held G. [1997] "The tolerable windows approach to integrated assessment approach", Communication au colloque *IPCC Asia Pacific workshop on Integrated Assessment models*, Tokyo, Japon, 10-12 mars, 34p.
- Turner R.K. [1992] "*Speculations on weak and strong sustainability*", Document de travail GEC 92-26, Center for Social and Economic Research on the Global Environment (CSERGE), University of East Anglia, 41p.
- UN [1998] "*World population estimates*", UN, New York.
- Van Daalen E., Thissen W., Grunfeld H., Leemans R. [1997] "The delft process: creating a dialogue between FCCC delegates and climate assessment scientists", *Change* n°35, 8-10.
- Van der Mensbrugghe [1998] "Summary of the workshop", Actes du colloque *Economic modelling of climate change*, OCDE, Paris, 17-18 septembre, pp.ix-xxvi.
- Von Neumann J., Morgenstern O. [1944] "*Theory of games and economic behavior*" (3^{ème} édition, 1953), Princeton University Press, Princeton, 641p.
- Von Weizsäcker C.-C. [1965] "Existence of optimal programs of accumulation for an infinite time horizon", *Review of Economic Studies* 32(2), 85-104.
- WEC (World Energy Council) [1993] "Energy for tomorrow's world: the realities, the real options and the agenda for achievements", Kogan Page, Londres.
- Weitzman M.L. [1974] "Prices vs Quantities", *Review of Economic Studies* 41(4), 477-491.
- Weitzman M.L. [1998] "Why the far-distant future should be discounted at its lowest possible rate", *Journal of Environmental Economics and Management* 36(3), 201-208.

- Weitzman M.L. [1999] "Just keep discounting, but...", in Portney P.R., Weyant J.P. (eds.) *Discounting and intergenerational equity*, Resources for the Future, Washington DC, pp.23-30.
- Westoff C.F. [1996] "Reproductive preferences and future fertility in developing countries", in Lutz W. (ed.) *The future population of the world: what can we assume today?*, IIASA, EarthScan Publications, Londres, pp.73-87.
- Weyant J., Davidson O., Dowlatabadi H., Edmonds J., Grubb M., Parson E.A., Richels R., Rotmans J., Shukla P.R., Tol R.S.J. [1996] "Integrated assessment of climate change: an overview and comparison of approaches and results" in Bruce J., Lee H., Haites E. (eds.), *Climate Change 1995: Economic and Social Dimensions of Climate Change* (chapitre 10), Cambridge University Press, Cambridge, pp.367-396.
- White A., Cannell M.G.R., Friend A.D. [1999] "Climate change impacts on ecosystems and the terrestrial carbon sink: a new assessment", *Global Environmental Change* 9 (supplementary issue), S21-S30.
- Wigley T.M.L., Richels R., Edmonds J. [1996] "Economic and environmental choices in the stabilization of atmospheric CO₂ concentrations", *Nature* 379, 240-243.
- World Bank [1992] *"World development report 1992"*, World Bank, Washington, 299p.
- World Bank [1994] *"World Bank Data 1994, Socio-economic information from the World Bank"*, Banque Mondiale, Wahsington DC, CD-ROM.

326 références

Glossaire

Air chaud (*hot air*) : quota attribué en excès à la Russie qui lui permettront de vendre des permis sans avoir à faire de réelles réductions (on parle aussi souvent de réduction fictive).

Annexe B : l'Annexe B au Protocole de Kyoto, Annexe I moins la Biélarussie et la Turquie.

Annexe 1 : l'Annexe 1 de la Convention Cadre sur les Changements Climatiques comprend l'OCDE, les pays est-européens et l'ex-URSS).

AOSIS : Alliance des petits Etats insulaires. Au sein de la convention climat, coalition ad hoc d'îles et de pays qui sont particulièrement vulnérables à la montée du niveau de la mer

Convention Cadre des Nations Unies sur le Changement Climatique (CCNUCC) : accord majeur dans le cadre de la lutte contre l'effet de serre, adopté au sommet de la Terre à Rio en 1992, la convention est rentrée en vigueur le 21 Mars 1998. Son objectif premier est de :

"stabiliser ... les concentrations de gaz à effet de serre dans l'atmosphère à un niveau qui empêche toute perturbation anthropique dangereuse du système climatique. Il conviendra d'atteindre ce niveau dans un délai suffisant pour que les écosystèmes puissent s'adapter naturellement aux changements climatiques, que la production alimentaire ne soit pas menacée et que le développement économique puisse se poursuivre d'une manière durable."

COP : Conference of the Parties to the UN Framework Convention on Climate Change.

Combustible fossiles : comprennent le pétrole le charbon et le gaz naturel.

Double dividende : notion selon laquelle les écotaxes peuvent à la fois réduire la pollution (le premier dividende) et réduire les coûts économiques totaux associés à un système fiscal donné en utilisant le revenu produit pour remplacer d'autres impôts plus distorsifs qui freient la croissance économiques (le deuxième dividende).

G77+China : groupe de pays au sein de la négociation climat qui contrairement à ce que son nom pourrait laisser penser regroupe 130 des principaux pays en développement (ce groupe se caractérise par sa grande hétérogénéité puisqu'il comprend à la fois des pays de l'OPEP et certains des pays les moins avancés (PMA)).

GES : Gaz à effet de serre.

GIEC : Groupe d'Experts Intergouvernemental sur l'Evolution du Climat (en anglais, IPCC, *Intergovernmental Panel on Climate Change*).

Gt : 1Gigatonne=10⁹ tonnes.

JUSCANZ : Japan , United States, Canada, Australia, New Zealand, "association" de pays dans le cadre de la négociation climat.

Mandat de Berlin : mandat donné par la conférence des parties visant à l'adoption de limites quantitatives contraignantes sur les émissions dans les pays de l'Annexe 1.

MDP mécanisme de développement propre , prévu par le Protocole de Kyoto (art 12), c'est un mécanisme permettant d'associer les pays hors Annexe 1 sur la base de projets réduisant les émissions

de GES et donnant lieu à des crédits de réduction d'émissions (CER). On parle aussi de CDM (en anglais *Clean Development Mechanism*).

Mt : 1 Mégatonne = 10^6 tonnes.

Partie : Pays qui a signé le Protocole de Kyoto

PEN: Permis d'émissions négociables (de gaz à effet de serre en l'occurrence).

PPM : parties par million en volume (ppmv).

Protocole de Kyoto : accord international entre 159 pays assistant à la troisième conférence des Parties à la Convention climat (COP3) qui s'est tenue à Kyoto en décembre 1997 dans le but de réduire les émissions mondiales de GES.

Puits de carbone (carbone sinks) : éléments de l'écosystème tels que les océans ou les forêts permettant de piéger du carbone en dehors de l'atmosphère

Table des matières

Remerciements	5
Sommaire	7
Introduction	9
1. Contexte : une mer d'incertitudes ?	9
1.1. Les impacts controversés du changement climatique	9
1.2. Les controverses sur les coûts de réduction des émissions de GES	13
1.3. La négociation climat	18
2. Problématique : de l'économie « pure » à la négociation autour d'un bien public futur	21
Partie 1 : De la balistique au tâtonnement, approche numérique de la décision sous incertitudes en matière d'effet de serre	27
Chapitre 1 Une pure métaphore : un agent et un bien en univers certain	29
1. Coûts bénéfiques ou coûts efficacité ?	31
1.1. Un débat rhétorique à remettre à sa juste place	31
1.2. La difficile monétarisation des impacts	33
2. L'arbitrage présent futur sous l'angle de l'actualisation	35
3. STARTS : modèle d'optimisation intertemporelle des politiques de réduction des émissions de CO ₂ fossiles	40
3.1. Module économique	41
3.2. Module climatique	44
3.3. Objectif de maximisation	47
3.4. Calibration	48
4. Où la question intergénérationnelle n'est pas un simple problème d'escompte ?	53
4.1. Faible taux d'escompte social et croissance des émissions	53
4.2. Nature du problème intergénérationnel : des « pics » dans les profils de dépense	54
4.3. Les pics de coûts sont-ils de simples artefacts de calcul ?	56
Conclusion	57
Chapitre 2 Figures logiques de la décision sous incertitudes	59
1. De la décision séquentielle en univers risqué	61
1.1. L'axiomatique de Von Neumann et Morgenstern	61
1.2. Décision séquentielle et préférences induites sur les revenus : l'aporie de Kreps et Porteus	62
1.3. De l'intérêt de l'hypothèse de maximisation de l'utilité en décision séquentielle	64
2. De la décision en univers incertain	65
2.1. Quatre critères de décision sous incertitudes	65
2.2. Axiomatique de la décision sous incertitudes	67
2.3. La contribution de Savage	69
2.4. Quelle figure logique pour la décision en matière de changement climatique ?	70
3. De la préférence pour la flexibilité	71
3.1. Critère de maximisation de l'utilité espérée et « préférence pour la flexibilité »	71
3.2. Une première leçon des débats sur le « timing » de l'action face au réchauffement climatique : le rôle clé de l'articulation incertitude – inertie	72
Conclusion	74

Chapitre 3 Vers une hiérarchisation des incertitudes pesant sur la décision de court terme.....	77
1. Comparaison théorique du rôle du taux d'actualisation et des autres incertitudes pesant sur le niveau d'abattement de court terme	79
1.1. Un modèle abstrait du problème de décision en matière d'effet de serre	79
1.2. Solution du problème de décision.....	82
1.3. Intuitions graphiques du comportement du modèle.....	83
1.4. Caractérisation analytique des solutions du modèle	90
2. Illustration numérique de l'impact d'une variation du taux d'actualisation sur la décision de court terme en matière d'effet de serre	93
2.1. Présentation du modèle.....	93
2.2. Incertitude sur le montant des dommages.....	95
2.3. Incertitude sur la nature de la fonction de dommage	97
2.4. Incertitude sur la productivité marginale du capital de long terme	99
Conclusion	101
Premier Entracte.....	103
Partie 2 : Les enjeux distributifs des politiques climatiques : vers une réflexion sur le contenu de l'héritage.....	105
Chapitre 4. Séparabilité des distributions spatiales et temporelles des coûts d'abattement	107
1. Principes normatifs de partage de la charge en univers certain.....	108
1.1. Cadre d'analyse du bien public futur « qualité de l'atmosphère ».....	108
1.2. « Solidarité universelle » : quand distributions spatiales et temporelles des coûts peuvent être séparées.....	112
1.3. « Solidarité dynastique » : quand équités inter et intragénérationnelle ne peuvent plus automatiquement être séparées	120
2. Incertitudes et règles de distribution des coûts et des bénéfices des politiques de réduction des émissions	128
2.1. Notations.....	128
2.2. Malgré les incertitudes, les règles d'allocation intratemporelles des coûts d'abattement à l'intérieur de chaque génération restent inchangées	129
2.3. La distribution temporelle des coûts change par contre de nature	130
Conclusion	132
Chapitre 5 De la « préférence pure pour le présent » à la préférence pour le non sacrifice du présent	135
1. Le critère actualisé.....	136
1.1. Une justification axiomatique : le théorème de Koopmans	136
1.2. Impacts du critère actualisé dans un modèle de croissance	140
1.3. Conclusion	150
2. « On ne peut donner moins de poids aux générations futures ! ».....	150
2.1. Le critère du mini-max	150
2.2. Une axiomatique de la soutenabilité : le critère de Chichilnisky	152
3. « Les gens ne se comportent pas ainsi ! ».....	158
3.1. Critiques de la pertinence des axiomes de Koopmans pour décrire les comportements des agents.....	159
3.2. L'actualisation hyperbolique comme critère de décision de la société ?	160
Conclusion : vers une réinterprétation de la « préférence pure pour le présent »	162
Chapitre 6 De l'équité intergénérationnelle à la nature de l'héritage	165

1. Nature du legs et flexibilité	167
1.1. Une dynamique économique « fluide » ?.....	167
1.2. ... ou « rigide » ?	168
1.3. De l'évaluation de la flexibilité.....	171
2. Première approche numérique du rôle de l'inertie différentielle dans l'évaluation des politiques climatiques	173
2.1. Représentation de l'inertie différentielle.....	174
2.2. Structure mathématique du modèle	176
2.3. Calibration du modèle : infrastructures de transport.....	180
2.4. Simulations numériques.....	184
Conclusion	189
Second Entracte	191
Partie 3 : Où la modélisation économique rejoint la réflexion institutionnelle.....	195
Chapitre 7 Le protocole de Kyoto au défi du long terme.....	197
1. L'héritage de dix ans de négociation sur le climat	198
1.1. Les enjeux de l'élargissement.....	198
1.2. Coordination par les prix ou coordination par les quantités, le legs du Protocole de Kyoto	201
2. De la diversité des scénarios de référence	203
2.1. 16 scénarios désormais incontournables... +1	204
2.2. Méthodologie d'analyse : la décomposition en indicateurs	209
2.3. Analyse indicateur par indicateur	211
2.4. Eléments d'une synthèse par famille de scénarios.....	223
Conclusion	228
Chapitre 8 Négociabilité des règles d'allocation internationale des quotas d'émissions	229
1. Multiplicité des règles d'allocation des quotas d'émissions.....	230
1.1. Des critères généraux d'allocation des quotas d'émissions	231
1.2. Principales règles d'allocation des quotas proposées dans la littérature	232
2. STARTS R : un modèle de simulation d'un marché de permis d'émissions négociables.....	235
2.1. Présentation du modèle	235
2.2. Calibration du modèle.....	240
3. Première évaluation de la stabilité des règles de convergence et de Jacoby	246
Conclusion	257
Chapitre 9 Irréductibilité des incertitudes et modes de coordination	259
1. L'impossibilité logique de la prévision à long terme	260
1.1. A court terme : possibilité d'une démarche « expérimentale »	261
1.2. A long terme : limite des connaissances et irréductible « effet papillon »	262
2. Le modèle pour cerner l'incertitude	264
2.1. Des machines à agréger et à traiter les données.....	264
2.2. Vers une première délimitation de champ des incertitudes.....	Erreur! Signet non défini.
2.3. Mais il reste nécessaire de faire face à l'incertitude	266
3. Sous controverses, le modèle pour hiérarchiser l'incertitude	266
3.1. Deux exemples d'utilisation des modèles dans le débat climatique	267
3.2. De l'intérêt des modèles économiques de long terme comme « langage de négociation ».....	270
3.3. Les modèles économiques pour hiérarchiser l'incertitude.....	271
3.4. Quelques perspectives de nature institutionnelles pour garantir le « bon usage » des modèles dans l'analyse.....	272

Conclusion : Retour sur nos résultats	273
Conclusion générale.....	277
Bibliographie	279
Glossaire.....	295
Table des Matières	297
Annexes	301

Annexes

Annexe 1 : Code informatique du modèle STARTS (chapitre 1, section 3)	303
Annexe 2 : Conditions du premier ordre des problèmes du chapitre 4	313
Annexe 3 : Code informatique du modèle STARTS 2 (chapitre 6, section 2)	317
Annexe 4 : Caractéristiques numériques des scénarios de référence La, Lb, Ha, Hb (chapitre 8, section 2.2.2)	325
Annexe 5 : Code informatique du modèle STARTS R (chapitre 8, section 2)	329

Annexe 1 Code informatique du modèle STARTS (chapitre 1, section 3)

Le modèle STARTS (Lecocq et Hourcade, 1997) est un modèle d'optimisation intertemporelle des politiques de réduction des émissions de gaz à effet de serre dans un monde comprenant un agent et un secteur. Les différentes versions de ce modèle ont été implémentées informatiquement sous GAMS (*General Algebraic Modeling System*) dont une description succincte est proposée dans la première section. Les codes GAMS des versions coûts efficacité, coûts bénéfices avec dommages linéaires et avec dommages non linéaires STARTS sont ensuite présentés dans les trois sections suivantes.

1. Description succincte de GAMS

GAMS constitue un véritable langage de programmation compilé dédié à la résolution de problèmes d'optimisations. Dans ce logiciel, les modèles sont d'abord écrits dans un langage dédié relativement naturel, proche dans sa syntaxe du langage Pascal (cf. les listings proposés ci-dessous). Le logiciel a ensuite pour tâche de les compiler et de confier l'exécution de l'optimisation elle-même à un sous-programme dédié (appelé « solveur »). Pour les simulations, nous avons utilisés les solveurs CONOPT et MINOS.

Le solveur GAMS/CONOPT est un outil spécifiquement construit pour résoudre de problèmes d'optimisation non linéaires à grand nombre de variables de la forme (1)-(3) suivante, où f et g peuvent être des fonctions non linéaires. L'algorithme utilisé est l'algorithme GRG (*Generalized Reduced Gradient*) proposé pour la première fois par Abadie et Carpentier (1969) puis amélioré pour tenir compte d'un grand nombre de variables (Drud, 1985, 1994).

$$\text{Min } f(x) \quad (1)$$

$$\text{s.c.} \quad g(x) = b \quad (2)$$

$$x_{\min} \leq x \leq x_{\max} \quad (3)$$

Le programme GAMS/MINOS est construit pour résoudre des problèmes de la forme (4)-(7) suivante. L'algorithme utilisé est un algorithme de lagrangien projeté (Robinson, 1972, Murtagh et Saunders, 1982) qui ramène tout problème à contraintes non linéaires (i.e. f non linéaire) à une série de résolutions de problèmes non linéaires à contraintes linéaires (i.e. f linéaire) résolus avec un algorithme de gradient réduit (Culioli, 1984).

$$\text{Min } F(x) + c^T \cdot x + d^T \cdot y \quad (4)$$

$$\text{s.c.} \quad f(x) + A_1 \cdot y < b_1 \quad (5)$$

$$A_2 \cdot x + A_3 \cdot y < b_2 \quad (6)$$

$$x_{\min} \leq x, y \leq x_{\max} \quad (7)$$

Les problèmes d'optimisation posés par les différents modèles de la famille STARTS peuvent être interprétés aussi bien comme des problèmes de la famille (1)-(3) et (4)-(7). Il suffit pour cela de changer la nature des fonctions objectifs. Notons que cette opération de traduction du modèle sous forme de listing GAMS en problème utilisable par l'un ou l'autre des solveurs est effectuée directement par le logiciel, l'utilisateur se bornant à indiquer le solveur qu'il souhaite utiliser.

2. STARTS coûts efficacité

* Modele STARTS - Cout efficacite

* _____

* Date de finition 06/06/97

* _____

*

* La version presentee ici a pour objectif de maximiser une fonction d'utilite sous

* contrainte de non dépassement d'une concentration atmosphérique cible en CO₂.

Sets	t	/1990,2000,2010,2020,2030,2040,2050,2060,2070,2080,2090,2100,2110,2120,2130,2140,2150,2160,2170,2180,2190,2200,2210,2220,2230,2240,2250,2260,2270,2280,2290,2300/

tfirst(t) premiere periode

tlast(t)	derniere periode;

Scalars	L0	population initiale	/5.3/
	txcrpop	taux de croissance (population+progres technique)	/0.02/
	K0	capital initial (G\$)	/95/
	C0	consommation initiale (G\$)	/14/
	I0	investissement initial (G\$)	/4/
	alpha	coefficient de K dans la fonction de production	/0.4233/
	txdpr	taux de depreciation du capital global	/0.03/
	Eb0	emissions initiales	/6/
	dcr	decrochement emissions - production	/1.228038/
	txdcr	taux de variation du decrochement emissions - production	/0.00667595/
	txabs	taux d'absorption des emissions dans l'atmosphere	/0.38/
	txdsp	taux de disparition du CO2 dans les puits	/0.0083/
	M0	concentration initiale en CO2	/354/
	Minf	concentration preindustrielle en CO2	/278/
	Mcible	plafond de concentration en CO2	/450/
	tarc	taux annuel de renouvellement du capital emetteur	/0.03/
	prglim	limite du progres technique autonome	/0.25/
	prgtx	taux de croissance du progres technique autonome sur A	/0.015/
	epsilon	terme technique (pour approcher le max)	/0.01/
	BK	cout de la backstop technology (M\$ par t)	/1.1/
	beta	parametre de la fonction d'utilite de Chichi	/0.1/
	periode	periode (ans)	/10/
	delta	taux de preference pure pour le present	/0.03/;

Parameters	lambda(t)	progres technique
	L(t)	population
	discount(t)	facteur d'actualisation
	decr(t)	decrochement emissions - croissance
	Ed(t)	emissions dues a la deforestation;

```
tfirst(t) = yes$(ord(t) eq 1);
tlast(t) = yes$(ord(t) eq card(t));
lambda(t) = prglim + (1-prglim)*exp(-prgtx*(ord(t)-1)*periode);
L(t) = L0 * (1 + txcrpop)**((ord(t)-1)*periode);
discount(t) = 1 / (1 + delta)**((ord(t)-1)*periode);
discount(tlast) = discount(tlast)/delta;
discount(t) = exp(-delta*log(ord(t)));
decr(t) = dcr*exp(-txdcr*((ord(t)-1)*periode));
```

*

```
loop(t,
      if(ord(t)<=21,
```

```

        Ed(t) = 1.4-((0.2/3)*(ord(t)-1));
    else
    Ed(t) = 0;
    );
);

```

Variables	K(t)	capital
	C(t)	consommation
	I(t)	investissement
	Eb(t)	emissions de base
	acc(t)	acceleration
	param(t)	parametre acceleration
	A(t)	abatement
	Ca(t)	cout de reduction des emissions
	M(t)	concentration
	saving(t)	taux d'epargne
	U	utilite totale;

```

A.lo(t) = 0;
K.lo(t) = K0;
C.lo(t) = C0;
I.lo(t) = I0/2;
M.lo(t) = M0;
Ca.lo(t) = 0;
Eb.lo(t) = Eb0;
param.lo(t) = -9;
acc.lo(t) = 0;
acc.fx(tfir) = 1;

```

```

A.up(t) = 30;
I.up(t) = 1000000;
M.up(t) = Mcible;
param.up(t) = +9;
acc.up(t) = 9;

```

```

K.fx(tfir) = K0;
M.fx(tfir) = M0;
M.fx(tlast) = Mcible;
A.fx(tfir) = 0;

```

Equations	eeb0(t)	emissions initiales
	eeb(t)	emissions de base
	pparam(t)	definition du parametre de l'acceleration
	aacc(t)	valeur de l'acceleration
	cca(t)	cout de l'abatement
	cc(t)	repartition de la production
	kk(t)	equation d'evolution du capital
	mm(t)	equation d'evolution de la concentration
	contrainte(t)	contrainte sur la concentration
	tc(t)	condition finale
	ssaving(t)	calcul du taux d'epargne
	utilite	fonction objectif (utilitariste ou de Chichilnisky);

```

eeb0(tfir) .. Eb(tfir)=e Eb0;
eeb(t+1) .. Eb(t+1)=eEb0*(1 + decr(t+1)* ( log( (C(t+1)+I(t+1)) / (C0+I0) ) / (ord(t)*periode) )
) **(ord(t)*periode);
pparam(t+1) .. param(t+1) =e= (A(t+1)-A(t))/(Eb(t+1)*tarc*periode);
aacc(t+1) .. acc(t+1) =e= 0.5*(sqrt(sqrt(param(t+1)-1)+sqrt(epsilon))+param(t+1))+0.5;

```

```

cca(t)      ..      Ca(t) =e= 1/3 * A(t)**3/Eb(t)**2 * lambda(t) * acc(t) * BK;
mm(t+1)     ..      M(t+1) =e= M(t) + periode * (txabs*(Eb(t)+Ed(t)-A(t))-txdsp*(M(t)-Minf));

contrainte(t) ..      M(t) =l= Mcible;

tc(tlast)   ..      K(tlast) =g= 2*K0;
cc(t)       ..      (K(t)**alpha)*(L(t)**(1-alpha)) =e= C(t) + I(t) + Ca(t);
kk(t+1)     ..      K(t+1) =e= K(t) + periode * (I(t) - txdpr * K(t));
utilite     ..      U =e= sum(t, periode*log(C(t))*discount(t));
ssaving(t)  ..      saving(t) =e= I(t) /(C(t) + I(t) + Ca(t));

```

Model starts /all/;

option nlp=conopt;

Solve starts maximizing U using nlp;

Display C.l, K.l, I.l, saving.l, Eb.l, A.l, Ca.l, M.l, U.l, decr;

```

file result /c:\gams\result.txt/ ;
put result ;
put @3,'t',@15,'K',@30,'I',@45,'C',@60,'saving',@75,'Ca'/;
loop(t,put @3,t.l,@15,K.l(t),@30,I.l(t),@45,C.l(t),@60,saving.l(t),@75,Ca.l(t)/ );
put /;
put @3,'t',@15,'Eb',@30,'A',@45,'M'/;
loop(t,put @3,t.l,@15,Eb.l(t),@30,A.l(t),@45,M.l(t)/ );
put /;

```

3. STARTS coûts bénéfiques – dommages linéaires

```

* Modele STARTS couts benefices lineaires
* -----
* Date de depart :09:43 12/06/97
* -----
* A servi pour calibrer les sommes cumulees des emissions
* Sert pour realiser les simulations pour le cas lineaire
* On fait tourner le modele avec une stabilisation a 2230
* On choisit pour le dommage : 5% pour 450 ppm
*                               3% pour 550 ppm
*                               1,5% pour 650 ppm
* Ces dommages donnent grosso modo le meme total cumule des emissions en 2200
* que dans le cas cout efficacite

```

```

Sets      t      /1990,2000,2010,2020,2030,2040,2050,2060,2070,2080,
                2090,2100,2110,2120,2130,2140,2150,2160,2170,2180,
                2190,2200,2210,2220,2230,2240,2250,2260,2270,2280,
                2290,2300/

```

```

tfirst(t)  premiere periode
tlast(t)   derniere periode;

```

```

Scalars  L0      population initiale      /5.3/
          txcrpop  taux de croissance (population+progres technique) /0.02/
          K0       capital initial (G$)     /95/
          C0       consommation initiale (G$) /14/
          I0       investissement initial (G$) /4/
          alpha    coefficient de K dans la fonction de production /0.4233/
          txdpr    taux de depreciation du capital global /0.03/
          Eb0      emissions initiales     /6/

```

dcr	decrochement emissions - production	/1.228038/
txdcr	taux de variation du decrochement emissions – production	/0.00667595/
txabs	taux d'absorption des emissions dans l'atmosphere	/0.38/
txdsp	taux de disparition du CO2 dans les puits	/0.0083/
M0	concentration initiale en CO2	/354/
Minf	concentration preindustrielle en CO2	/278/
tarc	taux annuel de renouvellement du capital emetteur	/0.03/
prglim	limite du progres technique autonome	/0.25/
prgtx	taux de croissance du progres technique autonome sur A	/0.015/
epsilon	terme technique (pour approcher le max)	/0.01/
BK	cout de la backstop technology (M\$ par t)	/1.1/
dtwice	dommages calcules pour M=2fois Minf	/0.0501/
periode	periode (ans)	/10/
delta	taux de preference pure pour le present	/0.03/;

Parameters lambda(t) progres technique
 L(t) population
 discount(t) facteur d'actualisation
 decr(t) decrochement emissions - croissance
 Ed(t) emissions dues a la deforestation;

tfirst(t) = yes\$(ord(t) eq 1);
 tlast(t) = yes\$(ord(t) eq card(t));
 lambda(t) = prglim + (1-prglim)*exp(-prgtx*(ord(t)-1)*periode);
 L(t) = L0 * (1 + txcrpop)**((ord(t)-1)*periode);
 discount(t) = 1 / (1 + delta)**((ord(t)-1)*periode);
 discount(tlast) = discount(tlast)/delta;
 * discount(t) = exp(-delta*log(ord(t)));
 decr(t) = dcr*exp(-txdcr*((ord(t)-1)*periode));

loop(t,
 if(ord(t)<=21,
 Ed(t) = 1.4-((0.2/3)*(ord(t)-1));
 else
 Ed(t) = 0;
);
);

Variables K(t) capital
 C(t) consommation
 I(t) investissement
 Eb(t) emissions de base
 dom(t) dommages dus a l'effet de serre
 acc(t) acceleration
 param(t) parametre acceleration
 A(t) abatement
 Ca(t) cout de reduction des emissions
 M(t) concentration
 saving(t) taux d'epargne
 cumul somme cumulee des emissions
 U utilite totale;

A.lo(t) = 0;
 K.lo(t) = K0;
 dom.lo(t) = 0;
 C.lo(t) = C0;
 I.lo(t) = 0;
 M.lo(t) = M0;

Annexe 1

Ca.lo(t) = 0;
Eb.lo(t) = Eb0;
param.lo(t) = -9;
acc.lo(t) = 0;

A.up(t) = 30;
I.up(t) = 10000;
M.up(t) = 1000;
param.up(t) = +9;
acc.up(t) = 9;
dom.up(t) = 0.9;

K.fx(tfirfirst) = K0;
M.fx(tfirfirst) = M0;
A.fx(tfirfirst) = 0;
dom.fx(tfirfirst) = 0;
dom.fx('2000') = 0;
acc.fx(tfirfirst) = 1;

A.fx('2000') = 0;
A.fx('2010') = 0;

Equations	eeb0(t)	emissions initiales
	eeb(t)	emissions de base
	pparam(t)	definition du parametre de l'acceleration
	aacc(t)	valeur de l'acceleration
	cca(t)	cout de l'abatement
	cc(t)	repartition de la production
	kk(t)	equation d'evolution du capital
	dommage(t)	valeur des dommages dus a l'effet de serre
	stabil(t)	stabilisation de M a partir de 2230
	mm(t)	equation d'evolution de la concentration
	tc(t)	condition finale 2
	posit(t)	limitation de l'abatement
	croiss(t)	le capital augmente
	ssaving(t)	calcul du taux d'epargne
	tc2(t)	controle de l'investissement finale
	ccumul	limite le cumul des emission
	utilite	fonction objectif;

eeb0(tfirfirst) .. Eb(tfirfirst) =e= Eb0;
eeb(t+1) .. Eb(t+1) =e= Eb0*(1+decr(t+1)*(log((C(t+1)+I(t+1))/(C0+I0))/(ord(t)*periode))))*(ord(t)*periode);
mm(t+1) .. M(t+1) =e= M(t)+periode*(txabs*(Eb(t)+Ed(t)-A(t))-txdsp*(M(t)-Minf));
ccumul .. cumul =e= sum(t\$(ord(t)<23), Eb(t)-A(t));
pparam(t+1) .. param(t+1) =e= (A(t+1)-A(t))/(Eb(t+1)*tarc*periode);
aacc(t+1) .. acc(t+1) =e= 0.5*(sqrt(sqr(param(t+1)-1)+sqr(epsilon))+param(t+1))+0.5;
cca(t) .. Ca(t) =e= 1/3 * A(t)**3/Eb(t)**2 * lambda(t) * acc(t) * BK;
dommage(t+2) .. dom(t+2) =e= dtwice*(M(t)-M0)/(2*Minf-M0);

cc(t) .. (K(t)**alpha)*(L(t)**(1-alpha)) =e= C(t) + I(t) + Ca(t);
kk(t+1) .. K(t+1) =e= K(t) + periode * (I(t) - txdpr * K(t));
utilite .. U =e= sum(t, periode*log(C(t)*(1-dom(t)))*discount(t));
ssaving(t) .. saving(t) =e= I(t) /(C(t) + I(t) + Ca(t));

posit(t) .. A(t) =l= Eb(t);
croiss(t+1) .. K(t+1) =g= K(t);
tc(tlast) .. K(tlast) =g= 2*K0;
stabil(t+1)\$ (ord(t)>24) .. M(t+1) =e= M(t);
tc2(tlast) .. saving(tlast) =l= 0.25;

```

model starts /all/;

option nlp=conopt;

Solve starts maximizing U using nlp;

Display C.l, K.l, I.l, saving.l, Eb.l, A.l, Ca.l, M.l, U.l, decr;

file result /c:\gams\stii\costben\R450-chi.txt/ ;
put result ;
put @3,'t',@15,'A',@35,'I',@50,'C',@65,'saving',@80,'K',@95,'CA',@100,'Concent',@115,'dom'/;
loop(t,put
@3,t.tl,@15,A.l(t),@30,I.l(t),@45,C.l(t),@60,saving.l(t),@75,K.l(t),@90,CA.l(t),@105,M.l(t),@120,dom.l(t)/ );
put /;
put @3,'t',@15,'Eb',@30,'A',@45,'M'/;
loop(t,put @3,t.tl,@15,Eb.l(t),@30,A.l(t),@45,M.l(t)/ );
put /;
put @3,'Utilite',@15,U.l/;
put /;
put @3,'somme',@15,cumul.l/;

```

4. STARTS coûts efficacité – dommages non linéaires

* Modele STARTS couts benefices non lineaires

* -----

* Date de creation : 17:18 12/06/97

* -----

* Version correcte en dommages non lineaires

* Version utilisee en dommages non lineaires

* Equivalent pour 450 ppm Mcible 560

* Equivalent 550 ppm 655

* Equivalent 650 ppm 750

Sets t /1990,2000,2010,2020,2030,2040,2050,2060,2070,2080,
2090,2100,2110,2120,2130,2140,2150,2160,2170,2180,
2190,2200,2210,2220,2230,2240,2250,2260,2270,2280,
2290,2300/

tfirst(t) premiere periode

tlast(t) derniere periode;

Scalars	L0	population initiale	/5.3/
	txcrpop	taux de croissance (population+progres technique)	/0.02/
	K0	capital initial (G\$)	/95/
	C0	consommation initiale (G\$)	/14/
	I0	investissement initial (G\$)	/4/
	alpha	coefficient de K dans la fonction de production	/0.4233/
	txdpr	taux de depreciation du capital global	/0.03/
	Eb0	emissions initiales	/6/
	dcr	decrochement emissions-production	/1.228038/
	txdcr	taux de variation du decrochement emissions - production	/0.00667595/
	txabs	taux d'absorption des emissions dans l'atmosphere	/0.38/
	txdsp	taux de disparition du CO2 dans les puits	/0.0083/
	M0	concentration initiale en CO2	/354/
	Minf	concentration preindustrielle en CO2	/278/
	Mcible	plafond de concentration en CO2	/560.5/
	tarc	taux annuel de renouvellement du capital emetteur	/0.03/
	prglim	limite du progres technique autonome	/0.25/

prgtx	taux de croissance du progres technique autonome sur A	/0.015/
epsilon	terme technique (pour approcher le max)	/0.01/
BK	cout de la backstop technology (M\$ par t)	/1.1/
dmax	dommages maximums dus a l'effet de serre	/1/
parad	parametre de la fonction de dommage	/38.05/
beta	parametre de Chichilnisky	/0.0/
periode	periode (ans)	/10/
delta	taux de preference pure pour le present	/0.03/;

```

Parameters      lambda(t)      progres technique
                L(t)        population
                discount(t)  facteur d'actualisation
                dcr(t)       decrochement emissions - croissance
                Ed(t)        emissions dues a la deforestation;

                tfirst(t) = yes$(ord(t) eq 1);
                tlast(t) = yes$(ord(t) eq card(t));
                lambda(t) = prglim + (1-prglim)*exp(-prgtx*(ord(t)-1)*periode);
                L(t) = L0 * (1 + txcrpop)**((ord(t)-1)*periode);
                discount(t) = 1 / (1 + delta)**((ord(t)-1)*periode);
                discount(tlast) = discount(tlast)/delta;
*               discount(t) = exp(-delta*log(ord(t)));
                dcr(t) = dcr*exp(-txdcr*((ord(t)-1)*periode));

                loop(t,
                    if(ord(t)<=21,
                        Ed(t) = 1.4-((0.2/3)*(ord(t)-1));
                    else
                        Ed(t) = 0;
                    );
                );

```

Variables	K(t)	capital
	C(t)	consommation
	I(t)	investissement
	Eb(t)	emissions de base
	dom(t)	dommages dus a l'effet de serre
	acc(t)	acceleration
	param(t)	parametre acceleration
	A(t)	abatement
	Ca(t)	cout de reduction des emissions
	M(t)	concentration
	saving(t)	taux d'epargne
	U	utilite totale;

```

A.lo(t) = 0;
K.lo(t) = 0;
dom.lo(t) = 0;
C.lo(t) = C0;
I.lo(t) = 0;
M.lo(t) = 0;
Ca.lo(t) = 0;
Eb.lo(t) = Eb0;
param.lo(t) = -9;
acc.lo(t) = 0;
acc.fx(tfirst) = 1;
A.up(t) = 30;
I.up(t) = 10000;

```

```

param.up(t) = +9;
acc.up(t) = 9;
dom.up(t) = 0.9;
K.fx(tfirst) = K0;
M.fx(tfirst) = M0;
dom.fx(tfirst) = 0;
dom.fx('2000') = 0;
A.fx('1990') = 0;

```

```

*A.fx('2000') = 0;
*A.fx('2010') = 0;

```

Equations	eeb0(t)	emissions initiales
	eeb(t)	emissions de base
	pparam(t)	definition du parametre de l'acceleration
	aacc(t)	valeur de l'acceleration
	cca(t)	cout de l'abatement
	cc(t)	repartition de la production
	kk(t)	equation d'evolution du capital
	dommage(t)	valeur des dommages dus a l'effet de serre
	mm(t)	equation d'evolution de la concentration
	contrainte(t)	contrainte sur la concentration
	tc(t)	condition finale 2
	tc2(t)	controle de l'investissement finale
	ssaving(t)	calcul du taux d'epargne
	croiss(t)	impose a K de croitre
	posit(t)	impose a l'abatement d'etre inferieur a Eb
	utilite	fonction objectif;

```

eeb0(tfirst) .. Eb(tfirst) = e= Eb0;
eeb(t+1) .. Eb(t+1) = e= Eb0*(1 + decr(t+1)* ( log( (C(t+1)+I(t+1)) / (C0+I0) ) / (ord(t)*periode) )
) ** (ord(t)*periode);
mm(t+1) .. M(t+1) = e= M(t) + periode*(txabs*(Eb(t)+Ed(t)-A(t))-txdsp*(M(t)-Minf));

pparam(t+1) .. param(t+1) = e= (A(t+1)-A(t))/(Eb(t+1)*tarc*periode);
aacc(t+1) .. acc(t+1) = e= 0.5*(sqrt(sqr(param(t+1)-1)+sqr(epsilon))+param(t+1))+0.5;
cca(t) .. Ca(t) = e= 1/3 * A(t)**3/Eb(t)**2 * lambda(t) * acc(t) * BK;
contrainte(t) .. M(t) = l= Mcible;
dommage(t+2) .. dom(t+2) = e= dmax*exp( -sqr((Mcible-M(t))/parad) ) ;

cc(t) .. (K(t)**alpha)*(L(t)**(1-alpha)) = e= C(t) + I(t) + Ca(t);
kk(t+1) .. K(t+1) = e= K(t) + periode * (I(t) - txdp * K(t));
utilite .. U = e= sum(t, periode*log(C(t)*(1-dom(t)))*discount(t));
croiss(t+1) .. K(t+1) = g= K(t);
posit(t) .. A(t) = l= Eb(t);
tc(tlast) .. K(tlast) = g= 2*K0;
tc2(tlast) .. saving(tlast) = l= 0.25;
ssaving(t) .. saving(t) = e= I(t) / (C(t) + I(t) + Ca(t));

```

```
Model starts /all/;
```

```
option nlp=conopt;
```

```
Solve starts maximizing U using nlp;
```

```
Display C.l, K.l, I.l, saving.l, Eb.l, A.l, Ca.l, M.l, U.l, decr;
```

```
file result /c:\gams\stii\costbnnl\450chi00.txt/ ;
```

```
put result ;
```

```
put @3,'t',@15,'A',@35,'I',@50,'C',@65,'saving',@80,'K',@95,'CA',@100,'Concent',@115,'dom'//;
```

```
loop(t,put
@3,t.tl,@15,A.l(t),@30,I.l(t),@45,C.l(t),@60,saving.l(t),@75,K.l(t),@90,CA.l(t),@105,M.l(t),@120,dom.l(t)/ );
put /;
put @3,'t',@15,'Eb',@30,'A',@45,'M';
loop(t,put @3,t.tl,@15,Eb.l(t),@30,A.l(t),@45,M.l(t)/ );
put /;
put @3,'Utilite',@30,U.l/;
```

Bibliographie

Abadie J., Carpentier J. [1969] "Generalization of the Wolfe Reduced Gradient method to the case of nonlinear constraints", in Fletcher R. (ed.) *Optimization*, Academic Press, New York, pp.37-47.

Drud A.S. [1985] "A GRG code for large sparse dynamic nonlinear optimization problems", *Mathematical Programming* Vol.31, 153-191.

Drud A.S. [1994] "CONOPT - A Large-Scale GRG Code", *ORSA Journal on Computing*, 6(2), 207-216.

Murtagh B.A., Saunders M.A. [1982] "A projected lagrangian algorithm and its implementation for sparse nonlinear constraints", *Mathematical Programming Study* Vol.16, 84-117.

Robinson S.M. [1972] "A quadratically convergent algorithm for general nonlinear programming problems", *Mathematical Programming* Vol.3, 145-156.

Annexe 2 Conditions du premier ordre du chapitre 4

1. Univers certain

1.1. « Solidarité universelle » dans un coûts efficacité (section 1.2.2)

Le Lagrangien du problème (4.15)-(4.19) s'écrit de la manière suivante :

$$L = \sum_i \alpha_i \cdot l_i \cdot U_i(y_i - a_i) + \sum_i \beta_i \cdot \varphi^n \cdot l_i^f \cdot U_i(y_i^f - a_i^f) - \lambda \cdot [C(x) - \sum_i l_i \cdot a_i] - \mu \cdot [C^f(x) - \sum_i l_i^f \cdot a_i^f] - v \cdot [\bar{x} - x - x^f] \quad (A-1)$$

Notons que la contrainte environnementale (4.19) est une contrainte inégalité. Le multiplicateur de Lagrange associé v peut ainsi en théorie être soit positif soit nul selon que la contrainte est active ou non. Nous supposons ici que cette contrainte est active, autrement dit que la qualité de l'atmosphère qui aurait été obtenue sans contrainte environnementale aurait été inférieure au seuil $\bar{x}$. Par contre, nous ne faisons pas apparaître dans le Lagrangien de multiplicateur associé aux contraintes de positivité des dépenses d'abattement (4.16) que nous supposons non actives (i.e. les abattement sont strictement positifs). Les conditions du premier ordre sont alors données par les équations suivantes :

$$\frac{\partial L}{\partial a_i} = 0 \Leftrightarrow \alpha_i \cdot \frac{\partial U_i}{\partial c} = \lambda \quad \forall i \quad (A-2)$$

$$\frac{\partial L}{\partial a_i^f} = 0 \Leftrightarrow \beta_i \cdot \varphi^n \cdot \frac{\partial U_i}{\partial c^f} = \mu \quad \forall i \quad (A-3)$$

$$\frac{\partial L}{\partial x} = 0 \Leftrightarrow \lambda \cdot C'(x) = v \quad (A-4)$$

$$\frac{\partial L}{\partial x_i^f} = 0 \Leftrightarrow \mu \cdot C^{f'}(x^f) = v \quad (A-5)$$

1.2. « Solidarité universelle » en coûts bénéfices

Le Lagrangien du problème (4.28)-(4.31) s'écrit maintenant de la manière suivante, en considérant toujours que la condition (4.29) de stricte positivité des coûts d'abattement est satisfaite.

$$L = \sum_i l_i \cdot \alpha_i \cdot U_i(c_i) + \varphi^n \cdot \sum_i l_i^f \cdot \beta_i \cdot U_i(c_i^f - d_i(x + x^f)) - \lambda \cdot [C(x) - \sum_i l_i \cdot a_i] - \mu \cdot [C^f(x) - \sum_i l_i^f \cdot a_i^f] \quad (A-6)$$

Soit les conditions du premier ordre suivantes :

$$\frac{\partial L}{\partial a_i} = 0 \Leftrightarrow \alpha_i \cdot \frac{\partial U_i}{\partial c} = \lambda \quad (A-7)$$

$$\frac{\partial L}{\partial a_i^f} = 0 \Leftrightarrow \beta_i \cdot \varphi^n \cdot \frac{\partial U_i}{\partial c^f} = \mu \quad (A-8)$$

$$\frac{\partial \mathbf{L}}{\partial x} = 0 \Leftrightarrow \lambda \cdot C'(x) = -\varphi^n \cdot \sum_i d_i'(x+x^f) \cdot l_i^f \cdot \beta_i \cdot \frac{\partial U_i}{\partial c^f} \quad (\text{A-9})$$

$$\frac{\partial \mathbf{L}}{\partial x_i^f} = 0 \Leftrightarrow \mu \cdot C^{f_i}(x^f) = -\varphi^n \cdot \sum_i d_i'(x+x^f) \cdot l_i^f \cdot \beta_i \cdot \frac{\partial U_i}{\partial c^f} \quad (\text{A-10})$$

2. « Solidarité dynastique »

2.1. Coûts efficacité

Le Lagrangien de problème (4.41) – (4.45) est donné par :

$$\mathbf{L} = \sum_i l_i \cdot \alpha_i \cdot W_i(y_i - a_i, y_i^f - a_i^f) - \lambda \cdot [C(x) - \sum_i l_i \cdot a_i] - \mu \cdot [C^f(x) - \sum_i l_i^f \cdot a_i^f] - v \cdot [\bar{x} - x - x^f] \quad (\text{A-11})$$

Soit les conditions du premier ordre suivantes :

$$\frac{\partial \mathbf{L}}{\partial a_i} = 0 \Leftrightarrow \alpha_i \cdot \frac{\partial W_i}{\partial c} = \lambda \quad (\text{A-12})$$

$$\frac{\partial \mathbf{L}}{\partial a_i^f} = 0 \Leftrightarrow l_i \cdot \alpha_i \cdot \frac{\partial W_i}{\partial c^f} = l_i^f \cdot \mu \quad (\text{A-13})$$

$$\frac{\partial \mathbf{L}}{\partial x} = 0 \Leftrightarrow \lambda \cdot C'(x) = v \quad (\text{A-14})$$

$$\frac{\partial \mathbf{L}}{\partial x_i^f} = 0 \Leftrightarrow \mu \cdot C^{f_i}(x^f) = v \quad (\text{A-15})$$

2.2. Coûts bénéfiques

Le Lagrangien du système (4.60)-(4.63) s'écrit de la manière suivante :

$$\mathbf{L} = \sum_i l_i \cdot \alpha_i \cdot W_i(y_i - a_i, y_i^f - a_i^f - d_i(x+x^f)) - \lambda \cdot [C(x) - \sum_i l_i \cdot a_i] - \mu \cdot [C^f(x^f) - \sum_i l_i^f \cdot a_i^f] \quad (\text{A-16})$$

Les conditions du premier ordre sont ainsi données par :

$$\frac{\partial \mathbf{L}}{\partial a_i} = 0 \Leftrightarrow \alpha_i \cdot \frac{\partial W_i}{\partial c} = \lambda \quad (\text{A-17})$$

$$\frac{\partial \mathbf{L}}{\partial a_i^f} = 0 \Leftrightarrow l_i \cdot \alpha_i \cdot \frac{\partial W_i}{\partial c^f} = l_i^f \cdot \mu \quad (\text{A-18})$$

$$\frac{\partial \mathbf{L}}{\partial x} = 0 \Leftrightarrow \lambda \cdot C'(x) = -\sum_i d_i'(x+x^f) \cdot l_i \cdot \alpha_i \cdot \frac{\partial W_i}{\partial c^f} \quad (\text{A-19})$$

$$\frac{\partial \mathbf{L}}{\partial x_i^f} = 0 \Leftrightarrow \mu \cdot C^{f_i}(x^f) = -\sum_i d_i'(x+x^f) \cdot l_i \cdot \alpha_i \cdot \frac{\partial W_i}{\partial c^f} \quad (\text{A-20})$$

3. Univers incertain

Le Lagrangien du problème (4.68)-(4.71) s'écrit de la manière suivante :

$$\mathbf{L} = \sum_i l_i \cdot \alpha_i \cdot U_i(y_i - a_i) + \sum_j p_j \cdot \varphi^n \cdot \sum_i l_i^f \cdot \beta_i \cdot U_i^f(y_i^f - a_{ij}^f - d_{ij}(x + x_j^f)) - \lambda \cdot [C(x) - \sum_i l_i \cdot a_i] - \sum_j p_j \cdot \mu_j \cdot [C^f(x_j^f) - \sum_i l_i^f \cdot a_{ij}^f] \quad (\text{A-21})$$

Les conditions du premier ordre sont donc :

$$\frac{\partial \mathbf{L}}{\partial a_i} = 0 \Leftrightarrow \alpha_i \cdot \frac{\partial U_i}{\partial c} = \lambda \quad (\text{A-22})$$

$$\frac{\partial \mathbf{L}}{\partial a_{ij}^f} = 0 \Leftrightarrow \beta_i \cdot \varphi^n \cdot \frac{\partial U_i}{\partial c^f} = \mu_j \quad (\text{A-23})$$

$$\frac{\partial \mathbf{L}}{\partial x} = 0 \Leftrightarrow \lambda \cdot C'(x) = -\varphi^n \cdot \sum_i \beta_i \cdot l_i^f \cdot \frac{\partial U_i}{\partial c^f} \cdot \sum_j p_j \cdot d_{ij}'(x + x_j^f). \quad (\text{A-24})$$

$$\frac{\partial \mathbf{L}}{\partial x_j^f} = 0 \Leftrightarrow \mu_j \cdot C^{f'}(x_j^f) = -\varphi^n \cdot \sum_i d_{ij}'(x + x_j^f) \cdot l_i^f \cdot \beta_i \cdot \frac{\partial U_i}{\partial c^f} \quad (\text{A-25})$$

Annexe 3 Code informatique du modèle STARTS 2 (chapitre 6, section 2)

Le modèle STARTS 2 a été développé en langage GAMS. Dans le code présenté ici, le modèle est divisé en deux parties : le module principal nommé STARTS2.GMS, et un fichier annexe nommé ST_REF.INC consacré à la calibration du modèle et aux stockages des données.

1. STARTS 2 : Corps du Modèle

Fichier STARTS2.gms

```
* Model STARTS sectorialise
* Nouvelle version tiree de STARTS 3B9.gms
* Creation : 3 decembre 1999
* Par : Franck Lecocq, CIRED
* Fichiers "include" : st_ref.inc
```

```
option iterlim = 5000 ;
option reslim = 4000 ;
```

Set

```
t      temps      /1*41/
g      generation  /1*12/
i      secteur    /R,F/
```

```
;
```

Scalar

```
ai      annee initiale /2000/
be      fraction des emissions absorbees dans l'atmosphere /0.00038/
de      terme de "fuite" des emissions /0.01/
mi      concentration atmospherique initiale en CO2 (ppm) /360/
mpre    concentration preindustrielle en CO2 (ppm) /274/
pe      duree de la periode (annees) /5/
txac    taux d'actualisation annuel
```

```
;
```

Parameter

```
actu(t)  facteur d'actualisation
cco1(i)  coefficient du terme d'ordre 1 de la fonction de couts
cmx(i)   cout maximal de reduction des emissions par secteur
ctde(i)  vitesse du progres technique autonome
ctli(i)  limite du progres technique autonome
ctmx(t,i)couts de reduction des emissions
* el(t)  emissions non fossiles de reference
* ki(g,i) generations de capital initiales
* kr(t,i) niveau de capital de reference par secteur
ng(i)    nombre de generations de capital pour chaque secteur (periodes)
* xi(g,i) coefficients d'emissions initiaux
* xr(t,i) coefficients d'emissions de reference
* yr(t)  niveau de production totale de reference
```

```
;
```

```
ng('R') = card(g);
```

Annexe 3

ng('F') = 5;

* Parametres de la fonction de couts

cco1(i) = 0;
cmx('R') = 1;
cmx('F') = 0.5;
Ctli(i) = 0.25;
Ctde('R') = 0.0025;
Ctde('F') = 0.01;

ctmx(t,i) = cmx(i)*(ctli(i) + (1-ctli(i))*(1+ctde(i))**(-(ord(t)-1)*pe));
display ctmx;

* Defini la dynamique de croissance de reference : txac, el, kr, yr, xr, ki, xi
\$include st_ref.inc

actu(t) = (1/(1+txac))**((ord(t)-1)*pe);

Variables

C(t) couts d'investissement a la periode t
CT(t,i) surcouts annuels de "leap frogging"
CTOT couts totaux d'investissement actualises
E(t,i) emissions par secteur
IV(t,i) investissement annuel
K(t,g,i) quantite totale de capital de la generation g
M(t) concentration atmospherique en CO2
X(t,g,i) coefficient d'emissions annuelles par unite de capital
XN(t,i) nouveau coefficient d'emissions a t

;

Positive variables C,CT,IV,K,M,X,XN;

* Valeurs initiales

K.fx('1',g,i) = ki(g,i);
M.fx('1') = mi;
X.fx('1',g,i) = xi(g,i);

* Les coefficients d'emissions ne peuvent se degrader par rapport a la situation actuelle
XN.up(t,i) = xr(t,i);

* Point de depart de l'optimisation

XN.l(t,i) = xr(t,i);
X.l(t,g,i) = xintr(t,g,i);
K.l(t,g,i) = kint(t,g,i);

Equations

Emis(t,i) Emissions annuelles a la periode t
Cout(t) Consommation annuelle a la periode t
Ctec(t,i) Cout de "leap frogging" annuels a la periode t
Trsk(t,g,i) Decalage du capital pour les generations sauf la premiere
Ivst(t,i) L'investissement devient generation de capital la plus recente
Cstr(t,i) La quantite totale de capital dans chaque secteur egale la valeur de reference
Trsx(t,g,i) Transition des coefficients d'emissions pour les generations sauf la premiere
Xdnx(t,i) Le coefficient technique a la premiere periode est inclus
Xdim(t,i) Les coefficients d'emissions diminuent entre deux periodes
Conc(t) Variation de la concentration entre deux periodes
Mmax Contrainte de concentration
Maxi Objectif de maximisation

;

```

* Definition de l'etat a la periode t
Emis(t,i)..      E(t,i) =e= sum(g$(ord(g)<=ng(i)), K(t,g,i)*X(t,g,i));
Cout(t) ..      C(t) =e= sum(i, IV(t,i)*(1+CT(t,i)));
Ctec(t,i) ..     CT(t,i) =e= ctmx(t,i)*(sqr(1-XN(t,i)/xr(t,i))+cco1(i)*(1-XN(t,i)/xr(t,i)));

* Transition du capital entre t et t+1
Trsk(t+1,g+1,i) .. K(t+1,g+1,i) =e= K(t,g,i);
Ivst(t+1,i) ..    K(t+1,'1',i) =e= pe*IV(t,i);
Cstr(t+1,i) ..    sum(g$(ord(g)<=ng(i)), K(t+1,g,i)) =e= kr(t+1,i);

* Transition des coefficients techniques entre t et t+1
Trsx(t+1,g+1,i) .. X(t+1,g+1,i) =e= X(t,g,i);
Xdnx(t+1,i) ..    X(t+1,'1',i) =e= XN(t,i);
Xdim(t+1,i) ..    XN(t+1,i) =l= XN(t,i);

* Dynamique de la concentration
Conc(t+1) ..      M(t+1) =e= M(t) + pe*(be*(sum(i,E(t,i))+el(t)) - de*(M(t) - mpre));

* Contrainte de concentration
Mmax(t) ..        M(t) =l= 450;

* Niveau total de consommation actualisee
Maxi ..           CTOT =e= sqr(sum(t$(ord(t)<card(t)), pe*C(t)*actu(t)));

Model STARTS /Emis,Cout,Ctec,Trsk,Ivst,Cstr,Trsx,Xdnx,Xdim,Conc,Mmax,Maxi/;
Solve STARTS minimizing CTOT using nlp;

File Sortie2 /c:\calcul\st_res2.txt/;
Put Sortie2;
Sortie2.pw = 255; Sortie2.pc = 5;
Put 'Niveaux de capital/';
Put 'temps','KR','KF','KRref','KFref','KRTref','KFTref/';
loop(t,
    Put t.tl,K.l(t+1,'1','R'),K.l(t+1,'1','F'),kint(t+1,'1','R'),kint(t+1,'1','F'),kr(t,'R'),kr(t,'F')/;
);
Put 'Coefficients d emissions/';
Put 'generation','XiR','XiF/';
loop(g,
    Put g.tl,xi(g,'R'),xi(g,'F')/;
);
Put 'Coefficients d emissions/';
Put 'temps','XR','XF','XRref','XFref/';
loop(t,
    Put t.tl,XN.l(t,'R'),XN.l(t,'F'),xr(t,'R'),xr(t,'F')/;
);
Put 'Emissions et concentrations/';
Put 'temps','ER','EF','ERref','EFref','M/';
loop(t,
    Put t.tl,E.l(t,'R'),E.l(t,'F'),Eref(t,'R'),Eref(t,'F'),M.l(t)/;
);
Sortie2.nd = 5;
Put 'Investissements, couts et niveaux de consommation/';
Put 'temps','CTR','CTF','IR','IF','IRref','IFref','C','Cref/';
Loop(t,
    Put
t.tl,CT.l(t,'R'),CT.l(t,'F'),(IV.l(t,'R')*(1+CT.l(t,'R'))),(IV.l(t,'F')*(1+CT.l(t,'F'))),iref(t,'R'),iref(t,'F'),(yr(t)-
C.l(t)),(yr(t)-sum(i,iref(t,i)))/;
);
Put 'ConsTot','ConsTotref/';
Put (pe*sum(t,actu(t)*yr(t))-sqrt(CTOT.l)),(pe*sum(t, actu(t)*(yr(t)-sum(i,iref(t,i)))));

```

2. Modèle STARTS 2 : Fichier annexe

Fichier ST_REF.INC.

* Model STARTS sectorialise
 * Fichier "include" : st_ref.inc
 * Creation : 4 decembre 1999
 * Par : Franck Lecocq, CIREC
 * Defini les parametres de la croissance de reference : txac, el, kr, yr, xr, ki, xi

* CROISSANCE ET INVESTISSEMENT

* Nous determinons le niveau de capital et d'investissement initial en supposant que nous
 * nous trouvons dans une economie en equilibre a un taux de croissance de 2,5%... Ce qui nous
 * permet d'examiner une distribution du capital par generation optimale ex ante.
 * Il serait important d'examiner ensuite la distribution reelle du capital par pays, ce qui
 * peut conduire a des chocs importants dans le futur (cf. le nucleaire en France...).

Scalar

crfu	Taux de croissance 2000-2200	/0.025/
crps	Taux de croissance 1940-2000	/0.025/
ppp	Taux de preference pure pour le present	/0.03/
pri	Part du capital rigide dans K total	/0.2/
txep	Taux d'epargne en 2000 (suppose constant)	/0.20/
yi	Production initiale (10 ¹² \$90)	/18/

;

Parameter

ki(g,i)	generations de capital initiales de reference
kr(t,i)	capital total futur de reference
iref(t,i)	investissement de reference
yr(t)	production totale de reference

;

Variables

KK(i)	Niveau de capital total initial dans le secteur i
II(i)	Niveau d'investissement initial dans chaque secteur
J1	Critere de minimisation;

Positive variable KK, II;

Equations

Eqlb(i)	equilibre le niveau de capital et les niveaux d'investissement
Epar	verifie que le taux d'epargne est bien respecte
Krat	verifie la distribution du capital entre secteurs;

Eqlb(i) ..	KK(i)*((1+crps)**(pe)-1)=pe*II(i)*(1-(1+crps)**(-ng(i)*pe));
Epar ..	sum(i, II(i))=e= txep*yi;
Krat ..	J1=e= (KK('R')*(1-pri) - KK('F')*pri)**2;

Model CINI /eqlb, epar, krat/;

Solve CINI minimizing J1 using nlp;

ki(g,i) = pe*II.l(i)*(1+crps)**(-ord(g)*pe);
 kr(t,i) = KK.l(i)*(1+crfu)**((ord(t)-1)*pe);
 yr(t) = yi*(1+crfu)**((ord(t)-1)*pe);
 iref(t,i) = II.l(i)*(1+crfu)**((ord(t)-1)*pe);
 txac = ppp + crfu;

display ki, kr;

* COEFFICIENTS D'EMISSIONS DE REFERENCE XR

- * Les coefficients d'émmissions pour les périodes antérieures a 2000 sont tout d'abord
- * en supposant que les coefficients ont diminué d'un pourcentage constant entre 1940
- * et 2100.
- * Les coefficients d'émmissions futurs sont ensuite calculés de manière itérative
- * a partir d'un scénario d'émmissions de référence.
- * Ils sont enfin "lissés" afin d'obtenir une courbe régulièrement décroissante et les
- * émissions de référence sont recalculées de manière à être cohérentes avec les coefficients
- * xr.

Scalar

psrei	Part du secteur rigide dans les émissions en 2000	/0.25/
psref	Part du secteur rigide dans les émissions en 2200	/0.4/

;

Parameter

Eref(t,i)	Emissions de référence par secteur
KINT(t,g,i)	Generations de capital intermédiaires
pse(t,i)	Part du secteur dans les émissions
txie(i)	Taux de croissance de l'intensité énergétique 1940-2000
xi(g,i)	Coefficients d'émissions initiaux
XINT(t,g,i)	Coefficients d'émissions à chaque date (paramètre intermédiaire)
xr(t,i)	Coefficients d'émissions de référence

;

Parameter

Etref(t) Emissions de référence (GtC par an) basées sur IIASA A2

/	1	7000
	2	7750
	3	8500
	4	9250
	5	10000
	6	10800
	7	11900
	8	12700
	9	13300
	10	14000
	11	15100
	12	16100
	13	16900
	14	17800
	15	18700
	16	19700
	17	20400
	18	21300
	19	21900
	20	22000
	21	22100
	22	22050
	23	22000
	24	21500
	25	21000
	26	20000
	27	19000
	28	18000
	29	17000
	30	15500
	31	14000
	32	12000
	33	10000

Annexe 3

34	8000
35	7000
36	6500
37	6000
38	5500
39	5000
40	4500
41	4000/;

$pse(t, 'R') = psrei + (psref - psrei) / (card(t) - 1) * (ord(t) - 1);$
 $pse(t, 'F') = 1 - pse(t, 'R');$

$Eref(t, i) = Eref(t) * pse(t, i);$

* calibration des coefficients d'emissions anterieurs a 2000

$txie('R') = 0.0018;$
 $txie('F') = 0.007;$

Variable

XXI(i) coefficient d'emissions initial a la premiere periode x
 J2 objectif de minimisation

;

Positive variable XXI;

Equations

Obje Objectif de minimisation

;

Obje .. J2 = $\sum(i, \sqrt{\sum(g\$ (ord(g) \leq ng(i)), XXI(i) * (1 + txie(i))^{pe * (ord(g) - 1)} * ki(g, i))} -$
 $Eref('1', i))$);

Model XINI1 /obje/;

Solve XINI1 minimizing J2 using nlp;

$xi(g, i) = XXI.l(i) * (1 + txie(i))^{pe * (ord(g) - 1)};$

* calcul iteratif des coefficients d'emissions futurs en fonction des emissions de reference

$XINT('1', g, i) = xi(g, i);$

$KINT('1', g, i) = ki(g, i);$

Loop(t,

$KINT(t+1, g+1, i) = KINT(t, g, i);$

$KINT(t+1, '1', i) = pe * iref(t, i);$

$XINT(t+1, g+1, i) = XINT(t, g, i);$

$XINT(t+1, '1', 'R') = (Eref(t+1, 'R') - Eref(t, 'R') + KINT(t, '12', 'R') * XINT(t, '12', 'R')) / KINT(t+1, '1', 'R');$

$XINT(t+1, '1', 'F') = (Eref(t+1, 'F') - Eref(t, 'F') + KINT(t, '5', 'F') * XINT(t, '5', 'F')) / KINT(t+1, '1', 'F');$

);

$xr(t, i) = XINT(t+1, '1', i);$

$xr(t, i) \$ (ord(t) \text{ eq } card(t)) = 0;$

* Le fichier sortie 1 rassemble les informations sur les coefficients d'emissions et les
 * emissions de reference avant et apres lissage.

File sortie1 /c:\calcul\st_res1.txt/;

Put Sortie1;

Put 'Modele starts.gms'/;

Put 'Donnees calibrees a partir du scenario d emissions de reference'/;

```

Put 'generation_____xiR_____xiF'/;
Loop(g,
    Put g.tl, xi(g,'R'), xi(g,'F')/;
);
Put 'temps_____xrR_____xF_____ER_____EF'/;
Loop(t,
    Put t.tl, xr(t,'R'), xr(t,'F'), Eref(t,'R'), Eref(t,'F')/;
);

* "lissage" des coefficients d'emissions

Set    j        /1*5/;

Variable
        coef(i,j) coefficient du terme polynomial de degre j
        J3        Objectif de minimisation
;

Equations
        pass(i)   la courbe passe par le point de depart
        obj3      minimisation
;

pass(i) ..      sum(j,coef(i,j)*(1/card(t))**(ord(j)-1)) =e= xr('1',i);
Obj3    ..      J3 =e= sum(i, sum(t, sqr(sum(j,coef(i,j)*(ord(t)/card(t))**(ord(j)-1)) - xr(t,i)))));

Model    lissage /pass, obj3/;
Solve lissage minimizing J3 using nlp;

* Le coefficient 0.01 et non 0 dans l'equation precedente permet de diviser ensuite par xr

xr(t,i) = max(sum(j, coef.l(i,j)*(ord(t)/card(t))**(ord(j)-1)), 0.01);

* calcul des nouvelles emissions de reference

Parameter    xintr(t,g,i);
xintr('1',g,i) = xi(g,i);
loop(t,
    Eref(t,i) = sum(g$(ord(g)<=ng(i)), xintr(t,g,i)*kint(t,g,i));
    xintr(t+1,g+1,i) = xintr(t,g,i);
    xintr(t+1,'1',i) = xr(t,i);
);

* EMISSIONS NON FOSSILES

Parameter    el(t)        Emissions non fossiles annuelles de reference (MtC par an);

loop(t, if(ord(t)<=22,    el(t) = 1400-((200/3)*(ord(t)-1));
                        else    el(t) = 0;));

* SORTIES FINALES

Put 'Donnees lissees'/;
Put 'temps_____xrR_____xF_____ER_____EF_____Eland-use'/;
Loop(t,
    Put t.tl, xr(t,'R'), xr(t,'F'), Eref(t,'R'), Eref(t,'F'), el(t)/;
);

```


Annexe 4 Caractéristiques numériques des scénarios de référence Ha, Hb, La et Lb (chapitre 8, section 2.2.2)

	CNZ	FSU	JAP	USA	WEU	CHI	IND	ROW	TOTAL
1990	48	413	124	250	377	1242	1171	1655	5280
2000	51	437	131	270	393	1424	1412	2086	6204
2010	53	453	133	283	398	1554	1635	2599	7108
2020	55	470	135	296	404	1683	1858	3112	8012
2030	55	482	135	301	404	1775	2051	3593	8797
2040	55	491	133	300	399	1831	2213	4042	9463
2050	55	499	132	298	394	1886	2375	4490	10129
2060	54	498	131	298	393	1900	2427	4680	10381
2070	54	497	131	297	392	1913	2479	4869	10633
2080	54	496	131	296	390	1926	2533	5071	10898
2090	54	495	130	296	389	1940	2588	5284	11177
2100	54	494	130	295	388	1953	2643	5497	11455

1. Populations (millions d'habitants) dans les quatre scénarios (Source : Leggett *et al.*, 1992, Morita et Lee, 1997)

	CNZ	FSU	JAP	USA	WEU	CHI	IND	ROW	TOTAL
1990	798	2089	2221	5501	6046	2028	1356	2461	22500
2000	954	1416	2655	6575	7227	3002	2007	3643	27479
2010	1141	1726	3173	7859	8638	4444	2971	5392	35344
2020	1363	2104	3793	9394	10326	6578	4398	7982	45937
2030	1630	2565	4534	11228	12342	9736	6510	11815	60361
2040	1948	3127	5419	13421	14753	14412	9637	17490	80206
2050	2328	3811	6477	16042	17634	21334	14265	25889	107780
2060	2783	4646	7742	19175	21078	31579	21115	38322	146441
2070	3327	5663	9254	22921	25194	46745	31256	56726	201085
2080	3976	6904	11062	27397	30115	69194	46266	83968	278881
2090	4753	8415	13222	32748	35997	102424	68485	124293	390336
2100	5681	10258	15805	39143	43027	151613	101374	183984	550884

2.1 PIB (milliards de dollars 1990) dans les scénarios de haute croissance (H)

	CNZ	FSU	JAP	USA	WEU	CHI	IND	ROW	TOTAL
1990	798	2089	2221	5501	6046	2028	1356	2461	22500
2000	926	1416	2577	6384	7017	2725	1822	3307	26176
2010	1075	1726	2991	7408	8143	3663	2449	4445	31901
2020	1248	2104	3471	8598	9451	4922	3291	5973	39059
2030	1448	2565	4029	9978	10968	6615	4423	8028	48054
2040	1681	3127	4676	11580	12729	8891	5945	10789	59415
2050	1950	3811	5426	13439	14772	11948	7989	14499	73835
2060	2264	4646	6297	15596	17144	16057	10737	19486	92227
2070	2627	5663	7308	18100	19896	21580	14429	26187	115791
2080	3049	6904	8482	21006	23090	29001	19391	35193	146116
2090	3538	8415	9843	24378	26797	38975	26060	47297	185305
2100	4106	10258	11423	28292	31099	52380	35023	63563	236145

2.2 PIB (milliards de dollars 1990) dans les scénarios de basse croissance (H)

	CNZ	FSU	JAP	USA	WEU	CHI	IND	ROW
μ_r	1,68	1,12	1,33	1,092	1,19	1,498	1,33	1,148
v_r	-16,88%	-9,45%	-12,83%	-9,45%	-12,15%	-9,45%	-9,45%	-9,45%

3.1 Elasticité PIB des émissions initiale et taux de variation annuel de cette élasticité dans les scénarios a (décroissance rapide de l'élasticité)

	CNZ	FSU	JAP	USA	WEU	CHI	IND	ROW
μ_r	1,2	0,8	0,95	0,78	0,85	1,07	0,95	0,82
v_r	-9,38%	-5,25%	-7,13%	-3,75%	-6,75%	-4,50%	-4,39%	-3,75%

3.2 Elasticité PIB des émissions initiale et taux de variation annuel de cette élasticité dans les scénarios b (décroissance lente de l'élasticité)

	CNZ	FSU	JAP	USA	WEU	CHI	IND	ROW	TOTAL
1990	179	1467	272	1350	835	648	198	807	5756
2000	218	1097	318	1541	960	969	282	1097	6482
2010	257	1285	363	1736	1078	1398	389	1448	7953
2020	293	1474	403	1930	1181	1947	519	1855	9601
2030	322	1656	437	2116	1263	2618	667	2309	11389
2040	344	1822	462	2290	1319	3398	830	2790	13254
2050	354	1964	476	2445	1344	4258	997	3273	15111
2060	353	2073	478	2576	1338	5150	1157	3729	16853
2070	340	2143	468	2678	1300	6013	1297	4125	18364
2080	317	2170	447	2747	1232	6777	1405	4431	19526
2090	286	2152	416	2780	1141	7373	1471	4622	20241
2100	249	2090	377	2777	1031	7743	1487	4682	20437

4.1 Emissions de CO₂ régionales dans le scénario Hb

	CNZ	FSU	JAP	USA	WEU	CHI	IND	ROW	TOTAL
1990	179	1467	272	1350	835	648	198	807	5756
2000	234	985	337	1613	1010	1124	321	1220	6844
2010	289	1228	399	1863	1171	1809	485	1712	8956
2020	335	1476	451	2081	1299	2705	678	2232	11257
2030	367	1708	487	2247	1380	3756	882	2701	13527
2040	377	1905	503	2346	1404	4841	1064	3035	15475
2050	366	2046	496	2368	1368	5795	1192	3167	16797
2060	334	2116	467	2311	1276	6441	1241	3069	17254
2070	287	2109	420	2181	1140	6648	1199	2761	16744
2080	232	2025	361	1989	975	6371	1076	2306	15335
2090	177	1872	296	1755	799	5669	896	1789	13253
2100	127	1667	232	1497	626	4684	693	1289	10816

4.2 Emissions de CO₂ régionales dans le scénario Ha

	CNZ	FSU	JAP	USA	WEU	CHI	IND	ROW	TOTAL
1990	179	1467	272	1350	835	648	198	807	5756
2000	211	1097	310	1508	938	877	259	1017	6217
2010	242	1285	346	1665	1033	1157	330	1254	7311
2020	270	1474	378	1819	1115	1485	409	1511	8461
2030	293	1656	404	1965	1180	1856	495	1782	9629
2040	309	1822	423	2098	1223	2259	583	2055	10772
2050	316	1964	434	2216	1243	2678	669	2318	11838
2060	315	2073	435	2315	1238	3090	749	2558	12773
2070	306	2143	428	2391	1208	3473	816	2760	13525
2080	289	2170	411	2443	1156	3801	867	2913	14049
2090	265	2152	387	2467	1084	4050	897	3007	14309
2100	236	2090	357	2464	996	4203	905	3036	14287

4.3 Emissions de CO₂ régionales dans le scénario Lb

	CNZ	FSU	JAP	USA	WEU	CHI	IND	ROW	TOTAL
1990	179	1467	272	1350	835	648	198	807	5756
2000	224	985	325	1572	979	985	287	1111	6468
2010	267	1228	374	1795	1107	1428	396	1469	8064
2020	302	1476	415	2009	1207	1972	522	1866	9769
2030	326	1708	442	2203	1270	2597	657	2279	11481
2040	334	1905	454	2367	1288	3259	789	2674	13070
2050	325	2046	449	2494	1260	3900	904	3014	14391
2060	301	2116	427	2575	1189	4448	989	3265	15310
2070	265	2109	391	2605	1083	4836	1032	3398	15720
2080	222	2025	344	2584	950	5012	1028	3399	15565
2090	177	1872	292	2512	804	4952	978	3266	14853
2100	134	1667	238	2393	657	4664	887	3016	13657

4.4 Emissions de CO₂ régionales dans le scénario La

Annexe 5 Code informatique du modèle STARTS R (chapitre 8, section 2)

Contrairement à STARTS 1 et 2, le modèle STARTS R est un modèle de simulation du fonctionnement d'un marché de permis d'émissions négociables. Le programme est bâti autour d'une boucle sur les périodes (Module 3 dans le programme principal ci-dessous). A chaque période, le programme recherche le prix des PEN qui équilibre l'offre et la demande de PEN sur le marché interne à l'annexe B. Des instructions spécifiques calculent ensuite l'impact de la croissance sur les différents PIB régionaux, puis on passe à la période suivante.

STARTS R reste programmé en langage GAMS. Dans l'objectif de permettre le test de plusieurs règles d'allocation des PEN et de plusieurs trajectoires de référence, le traitement des données a été le plus possible séparé du programme principal. STARTS R comprend ainsi les 5 sous-programmes suivants :

- Le premier, nommé STARTSRbslXX.INC renferme les informations brutes sur le scénario de référence considéré (trajectoires d'émissions régionales, de PIB et de population).
- Le sous-programme MOD1.GMS extrait des informations de base les taux de croissance du PIB régionaux.
- Le sous-programme MOD3.GMS calcule ensuite pour chaque région l'élasticité PIB des émissions de CO₂ implicites dans le scénario de référence. Ces paramètres (les μ_r et v_r du chapitre 8) sont nécessaires pour calculer l'impact d'une baisse ou d'une hausse du PIB sur les émissions.
- Le module STARTSRcst.INC introduit ensuite les données sur les coûts d'abattement régionaux.
- Le module STARTSRuleXX.INC introduit les paramètres relatifs à la règle d'élargissement de l'annexe B et d'allocation des quotas d'émissions considérée.

Nous présentons ici successivement chacun de ces modules, en ne donnant qu'un seul exemple pour les modules dont le contenu dépend du scénario de référence ou des règles.

1. STARTS R : Programme principal

```
*****
* Model STARTSR                                     *
* A Parametrized Permit Market Model                 *
* Franck Lecocq, Thierry Le Pesant                   *
* Created: october 1998, this version: april, 21 1999 *
* Version 2.2 - Quota independant of decisions        *
* - Costs independant of decisions                   *
*****

$title Model STARTSR version 2.2 (23/04/99)
$eolcom !!
$dollars

* BEGINNING OF PROGRAM *****

Set          t          time          /1990,2000,2010,2020,2030,2040,2050,2060,2070,2080,2090,2100/;
Scalar  pr          period duration (yrs)          /10/;

* REFERENCE CASE DATA *****

$include /Include/STARTSRbsl5.inc
```

```

*****
* MODULE 1 : REFERENCE GROWTH RATE COMPUTATION *****
*****

Parameter      gref(t,r) reference growth rate;
$include mod1.gms

*****

* MODULE 2 : GDP TO GROWTH RELATION COMPUTATION *****
*****

Parameters      alpha(r) CO2 to GDP parameter 1
                  beta(r) CO2 to GDP parameter 2;
$include mod3.gms

* ABATEMENT COSTS DATA *****

$include /Include/STARTSRcst2.inc

* RULES DATA *****

$include /Include/STARTSRruleBh.inc

*****

* MODULE 3 : PERMITS MARKET EQUILIBRIUM COMPUTATION *****
*****

Set      market(r)      lists regions in market;
Alias(t,u);

Parameters  A(t,r,s) Effective abatement level (in % of baseline emissions)
              Ec(t,r,s) Corrected refence CO2 Emissions (MtC per year)
              GDP(t,r,s) Effective GDP (G$ per year)
              Cmar(t,r,s) Marginal abatement costs ($ per tC)
              Ctot(t,r,s) Total abatement costs (G$ per year)
              Tsf(t,r,s) Incoming transfer (G$ per year)
              Sps(t,r,s) Surplus from transfers (total costs minus transfers) (G$ p year)
              E(t,r,s) Effective emissions (MtC per year)
              p(t,s) Effective permit price ($ per tC);

a(t,r,s) = 0; Ec(t,r,s) = Eref(t,r); GDP(t,r,s) = GDPref(t,r);
Cmar(t,r,s) = 0; Ctot(t,r,s) = 0; Tsf(t,r,s) = 0; Sps(t,r,s) = 0;
E(t,r,s) = Eref(t,r); p(t,s) = 0; !! Parameters initialisation

* Market equilibration model *****

Parameter      EEref(r) Reference emissions (MtC per yr)
                  QQta(r) Emissions quota (MtC per yr)
                  CCoe(i,r) Abatement costs coefficients;

Variables      AA(r) Abatement level (% of baseline emissions)
                  CC(r) Current emission reduction costs (transfers included) in G$
                  CCTot Total discounted costs (in G$);

Positive variable AA, CC;
AA.up(r)=1;

Equations      DEFCosts(r) Abatement costs computation
                  DEFCtot Total discounted costs computation
                  CSTR Global constraint on emissions;

```

```

DEFCosts(r)$market(r) .. CC(r) = e= ERef(r)*sum(i,ccoe(i,r)*power(AA(r),ord(i)+1)/(ord(i)+1));
DEFCtot                .. CCtot = e= sum(r$market(r), CC(r));
CSTR                   .. sum(r$market(r),((1-AA(r))*ERef(r)-QQta(r))) = l= 0;

Model equi            /DEFCosts,DEFCtot,CSTR/;

* Scenario loop beginning *****

loop(s,

* Time loop beginning *****

    loop(t$(ord(t)>2),
        market(r)=no;
        market(r)$(flag(t,r)=1)=yes;                !! Regions in market

        QQta(r)=Qta(t,r,s);
        EERef(r)=Ec(t,r,s);
        CCoe(i,r)=coe(t,r,i);                        !! Passes parameters to the equilibrium model

        Solve equi Minimizing CCtot using NLP;

        A(t,r,s)$market(r) = AA.l(r);
        Cmar(t,r,s) = sum(i,coe(t,r,i)*(a(t,r,s)**(ord(i)))));
        Ctot(t,r,s) = Ec(t,r,s)*sum(i,coe(t,r,i)*(a(t,r,s)**(ord(i)+1)/(ord(i)+1)))/1000;
        p(t,s) = Cmar(t,'USA',s);
        E(t,r,s) = (1-a(t,r,s))*Ec(t,r,s);
        Tsf(t,r,s)$market(r) = (Qta(t,r,s)-E(t,r,s))*p(t,s)/1000;
        Sps(t,r,s)$market(r) = Tsf(t,r,s) - Ctot(t,r,s); !! Computes transfers and surplus

        GDP(t+1,r,s) = GDP(t,r,s)*(1+gref(t+1,r))**(pr);
        GDP(t+1,r,s)$market(r) = GDP(t,r,s)*(1+gref(t+1,r))**(pr) +
        pr*(delta(r)+mu(r)+gref(t+1,r))*sigma(r)*Sps(t,r,s);

                                                !! Computes new GDP

        Ec(t+1,r,s)
Ec('1990',r,s)*(abs(GDP(t+1,r,s)/GDP('1990',r,s))**(alpha(r)+beta(r)*(ord(t)+1)));
                                                !! Computes new emissions

    );

);

* Model Output *****

File Output          /c:\calcul\result\5BhC2.res/;
Output.nd = 2;
Put Output;
Loop(s,
    Put 'scenario ',ceiling(s)/;
    Put /;
    Put 'Abatement'/;
    Put @1,'t',@15,loop(r,put r.tl);
    Put /;
    Loop(t,
        Put t.tl, loop(r,put(Ec(t,r,s)-E(t,r,s)));
        Put /;
    );
    Put 'Marginal abatement costs'/;

```



```

Put @1,'t',@15,loop(r,put r.tl);
Put /;
Loop(t,
    Put t.tl, loop(r,put(Cmar(t,r,s)));
    Put /;
);
Put 'Overall Costs'/;
Put @1,'t',@15,loop(r,put r.tl);
Put /;
Loop(t,
    Put t.tl, loop(r,put(Ctot(t,r,s)));
    Put /;
);
Put 'Transfers'/;
Put @1,'t',@15,loop(r,put r.tl);
Put /;
Loop(t,
    Put t.tl, loop(r,put(Tsf(t,r,s)));
    Put /;
);
Put 'Surpluses'/;
Put @1,'t',@15,loop(r,put r.tl);
Put /;
Loop(t,
    Put t.tl, loop(r,put(Sps(t,r,s)));
    Put /;
);
Put 'Baseline GDP'/;
Put @1,'t',@15,loop(r,put r.tl);
Put /;
Loop(t,
    Put t.tl, loop(r,put(GDPref(t,r)));
    Put /;
);
Put 'Effective GDP'/;
Put @1,'t',@15,loop(r,put r.tl);
Put /;
Loop(t,
    Put t.tl, loop(r,put(GDP(t,r,s)));
    Put /;
);
Put 'Baseline emissions'/;
Put @1,'t',@15,loop(r,put r.tl);
Put /;
Loop(t,
    Put t.tl, loop(r,put(Eref(t,r)));
    Put /;
);
Put 'Corrected baseline emissions'/;
Put @1,'t',@15,loop(r,put r.tl);
Put /;
Loop(t,
    Put t.tl, loop(r,put(Ec(t,r,s)));
    Put /;
);
Put 'Effective emissions'/;
Put @1,'t',@15,loop(r,put r.tl);
Put /;
Loop(t,
    Put t.tl, loop(r,put(E(t,r,s)));

```

```

        Put /;
    );
    Put 'Delta GDP';
    Put @1,'t',@15,loop(r,put r.tl);
    Put /;
    Loop(t,
        Put t.tl, loop(r,put(GDP(t,r,s)/GDPref(t,r)));
        Put /;
    );
    Put 'Delta Emissions';
    Put @1,'t',@15,loop(r,put r.tl);
    Put /;
    Loop(t,
        Put t.tl, loop(r,put(Ec(t,r,s)/Eref(t,r)));
        Put /;
    );
);
Loop(s,
    Put 'scenario ',ceiling(s);
    Put /;
    Put 'Quota';
    Put @1,'t',@15,loop(r,put r.tl);
    Put /;
    Loop(t,
        Put t.tl, loop(r,put(Qta(t,r,s)));
        Put /;
    );
);

* END OF PROGRAM *****

```

2. STARTS R : Module d'introduction des données brutes du scénario de référence (STARTSRbslXX.INC)

* File STARTSRbsl4.inc
 * Franck Lecocq, Thierry Le Pesant
 * Created: april, 26 1999
 * To be included within STARTSR2*.gms models

* Personal Baseline
 * Low growth, pessimistic about GDP to emissions relation

Set r regions /CNZ,FSU,JAP,USA,WEU,CHI,IND,ROW/;

Table GDPref(t,r)	Gross Regional Product (billions \$)							
	CNZ	FSU	JAP	USA	WEU	CHI	IND	ROW
1990	798	2089	2221	5501	6046	2028	1356	2461
2000	926	1416	2577	6384	7017	2725	1822	3307
2010	1075	1726	2991	7408	8143	3663	2449	4445
2020	1248	2104	3471	8598	9451	4922	3291	5973
2030	1448	2565	4029	9978	10968	6615	4423	8028
2040	1681	3127	4676	11580	12729	8891	5945	10789
2050	1950	3811	5426	13439	14772	11948	7989	14499
2060	2264	4646	6297	15596	17144	16057	10737	19486
2070	2627	5663	7308	18100	19896	21580	14429	26187
2080	3049	6904	8482	21006	23090	29001	19391	35193
2090	3538	8415	9843	24378	26797	38975	26060	47297

2100 4106 10258 11423 28292 31099 52380 35023 63563
;

Table POPref(t,r) population de reference (millions)

	CNZ	FSU	JAP	USA	WEU	CHI	IND	ROW
1990	48	413	124	250	377	1242	1171	1655
2000	51	437	131	270	393	1424	1412	2086
2010	53	453	133	283	398	1554	1635	2599
2020	55	470	135	296	404	1683	1858	3112
2030	55	482	135	301	404	1775	2051	3593
2040	55	491	133	300	399	1831	2213	4042
2050	55	499	132	298	394	1886	2375	4490
2060	54	498	131	298	393	1900	2427	4680
2070	54	497	131	297	392	1913	2479	4869
2080	54	496	131	296	390	1926	2533	5071
2090	54	495	130	296	389	1940	2588	5284
2100	54	494	130	295	388	1953	2643	5497;

Parameter GDPpcref(t,r) per capita GDP (in \$ per person);

GDPpcref(t,r) = GDPref(t,r)/POPref(t,r)*1000;

Table Eref(t,r) reference CO2 emissions (MtC per year)

	CNZ	FSU	JAP	USA	WEU	CHI	IND	ROW
1990	179	1467	272	1350	835	648	198	807
2000	224	985	325	1572	979	985	287	1111
2010	267	1228	374	1795	1107	1428	396	1469
2020	302	1476	415	2009	1207	1972	522	1866
2030	326	1708	442	2203	1270	2597	657	2279
2040	334	1905	454	2367	1288	3259	789	2674
2050	325	2046	449	2494	1260	3900	904	3014
2060	301	2116	427	2575	1189	4448	989	3265
2070	265	2109	391	2605	1083	4836	1032	3398
2080	222	2025	344	2584	950	5012	1028	3399
2090	177	1872	292	2512	804	4952	978	3266
2100	134	1667	238	2393	657	4664	887	3016

;

Parameter Empcref(t,r) per capita emissions (in ton per person);

Empcref(t,r) = Eref(t,r)/POPref(t,r);

Parameter rho(r) regional discount rate (%)

/CNZ 0.05

FSU 0.05

JAP 0.05

USA 0.05

WEU 0.05

CHI 0.05

IND 0.05

ROW 0.05/;

3. Sous-programme de calcul des taux de croissance régionaux

```
*****
* Model mod1.gms                                     *
* Franck Lecocq, Thierry Le Pesant                   *
* Created: april, 23 1999                             *
* To be used with STARTSR22.gms model                *
* This model computes reference growth rates          *
*****
```

```

gref(t,r)$(ord(t)=1)=1;
gref(t+1,r) = (GDPref(t+1,r)/GDPref(t,r))**(1/pr)-1;

```

Parameters delta(r) pure time preference
 mu(r) capital depreciation rate
 sigma(r) fraction of transfers invested;

```

delta(r)=0.01;
delta('CHI')=0.03; delta('IND')=0.03; delta('ROW')=0.03;
sigma(r) = 0.8;

```

Parameter	mu(r)	capital depreciation rate
/CNZ	0.05	
FSU	0.05	
JAP	0.05	
USA	0.05	
WEU	0.05	
CHI	0.05	
IND	0.05	
ROW	0.05/;	

4. Sous-programme de calcul des élasticités PIB des émissions

```

*****
* Model mod2.gms                                     *
* Franck Lecocq, Thierry Le Pesant                  *
* Created: april, 23 1999                           *
* To be used with STARTSR22.gms model               *
* This model computes emission to GDP relations     *
*****

```

```

Parameter CO2pref(t,r);
CO2pref(t,r) = Eref(t,r)/POPref(t,r);

```

Parameters	CCO2(t)	Per capita emissions (MtC per cap)
	GGDP(t)	Per capita GDP (\$ per cap);

Variable c1

```

c2
DD(t)
J;

```

Equations	DEFD(t)
	DEFJ;

```

DEFD(t) .. DD(t) =e= log(CCO2(t)/CCO2('1990')) - (c1+c2*ord(t))*log(GGDP(t)/GGDP('1990'));
DEFJ .. J =e= sum(t, sqr(DD(t)));

```

Model emissions /DEFD,DEFJ/;

```

Loop(r,
  CCO2(t) = Eref(t,r);
  GGDP(t) = GDPref(t,r);
  c1.l=0; c2.l=0;

  Solve emissions minimizing J using NLP;

  alpha(r)=c1.l;
  beta(r)=c2.l;

```

);

Parameter Erefbis(t,r);

Erefbis('1990',r) = Eref('1990',r);

Erefbis(t,r)\$ (ord(t)>1) = Erefbis('1990',r)*(GDPref(t,r)/GDPref('1990',r))**(alpha(r)+ord(t)*beta(r));

5. Module d'entrée des coûts d'abattement régionaux

* File STARTSRcst1.inc

* Franck Lecocq, Thierry Le Pesant

* Created: april, 21 1999

* To be included within STARTSR2*.gms models

* Costs Edmonds

* Extracted from 1997 SGM data (1990-2050) and extrapolated to 2100

* Coefficients set equal for each period

Set i polynomial cost function exponents /1,2,3/;

Table coe(t,r,i) polynomial abatement cost function coefficients (k\$ per tC)

	1	2	3
1990.CNZ	0.6684	-2.7857	8.1187
1990.FSU	0.8424	-4.2413	6.7808
1990.JAP	0.6741	-0.1987	6.1690
1990.USA	1.0739	-6.7606	17.941
1990.WEU	1.7411	-14.505	40.494
1990.CHI	0.8339	-3.8297	5.1799
1990.IND	0.9452	-4.7378	7.2024
1990.ROW	0.5047	-1.8182	6.0947;

* Moves coefficient to \$ per tons of carbon

coe(t,r,i)\$ (ord(t)>1)=coe('1990',r,i)*1000;

coe('1990',r,i)=coe('1990',r,i)*1000;

6. Module d'introduction des paramètres de la règle d'élargissement de l'annexe B et d'allocation des quotas d'émissions de CO₂

* File STARTSRruleA.inc

* Franck Lecocq, Thierry Le Pesant

* Created: april, 21 1999

* To be included within STARTSR2*.gms models,

* Entitlement rule : convergence 2050

Set s scenario /1,2,3/;

Parameter ceiling(s) environmental target (max CO2 concentration in ppm)

/1	450
2	550
3	650/;

Table flag(t,r) countries in (1) or out (0) market

	CNZ	FSU	JAP	USA	WEU	CHI	IND	ROW
1990	0	0	0	0	0	0	0	0
2000	0	0	0	0	0	0	0	0

2010	1	1	1	1	1	0	0	0
2020	1	1	1	1	1	0	0	0
2030	1	1	1	1	1	1	1	1
2040	1	1	1	1	1	1	1	1
2050	1	1	1	1	1	1	1	1
2060	1	1	1	1	1	1	1	1
2070	1	1	1	1	1	1	1	1
2080	1	1	1	1	1	1	1	1
2090	1	1	1	1	1	1	1	1
2100	1	1	1	1	1	1	1	1;

Parameter Qta(t,r,s) CO2 emissions quotas (MtC per yr);

* No constraint when out of market

$Qta(t,r,s) \$(flag(t,r)=0)=Eref(t,r);$

* Kyoto protocol

$Qta('2010','CNZ',s)=168; Qta('2010','FSU',s)=1174;$

$Qta('2010','JAP',s)=256; Qta('2010','USA',s)=1283;$

$Qta('2010','WEU',s)=785;$

* Same quota in 2010 and 2020

$Qta('2020',r,s) \$(flag('2020',r)=1)=Qta('2010',r,s);$

Parameter pce(s) per capita emissions after 2050 (tC per person per yr)

/1 0.5

2 0.8

3 1.1/;

* Quota after 2050 depends on pop

$Qta(t,r,s) \$(ord(t)>6)=POPref(t,r)*pce(s);$

* Linear convergence from 2020 to 2050

$Qta(t,r,s) \$((ord(t)>4)*(ord(t)<7))=Qta('2020',r,s)+(ord(t)-4)/3*(Qta('2050',r,s)-Qta('2020',r,s));$

