

ECOLE DES HAUTES ETUDES EN SCIENCES SOCIALES

**AMPLITUDE ET CALENDRIER DES POLITIQUES DE REDUCTION
DES EMISSIONS FACE AUX RISQUES CLIMATIQUES**

LEÇONS DES MODELES INTEGRES

PHILIPPE AMBROSI

Thèse pour l'obtention du titre de Docteur de l'EHESS
Programme doctoral

MME JAN CORFEE-MORLOT	
M. ROGER GUESNERIE	
M. JEAN-CHARLES HOURCADE	directeur
M. PIERRE-ALAIN JAYET	rapporteur
M. HERVE LE TREUT	rapporteur
M. BERT METZ	

Version soumise aux membres du jury le 1^{er} mars 2004

AMPLITUDE ET CALENDRIER DE L'ACTION DES POLITIQUES DE REDUCTION DES EMISSIONS FACE AUX RISQUES CLIMATIQUES

LEÇONS DES MODELES INTEGRES

Introduction générale

CHAPITRE I

Evaluer les dommages : une *science* en gestation ?

CHAPITRE II

La décision au péril de l'incertitude scientifique

CHAPITRE III

La décision séquentielle comme stratégie de précaution

CHAPITRE IV

Incertain sur la sensibilité du climat, sur le rythme et le niveau critique de réchauffement :
Leçons du modèle *RESPONSE_Θ*

CHAPITRE V

Préférence pour la stabilité du climat et politiques climatiques :
Leçons du modèle *RESPONSE_Π*

CHAPITRE VI

Vers une analyse coût-bénéfice généralisée :
Leçons du modèle *RESPONSE_Δ*

Conclusion générale

Références bibliographiques

ANNEXE

Codes des modèles *RESPONSE*

**Introduction
générale**

Face aux menaces du changement climatique, la communauté internationale a été longue à se mobiliser et on peut compter une quinzaine d'années entre les premières alertes scientifiques et l'adoption du Protocole de Kyoto. La prise de conscience des risques associés au changement climatique a émergé dans les années 80, décennie pendant laquelle une série de conférences scientifiques ont attiré l'attention sur les dangers potentiels d'une perturbation par l'homme de l'atmosphère et des mécanismes du climat : appauvrissement de la couche d'ozone, émissions et transport à longue distance de substances toxiques ou acidifiantes et renforcement de l'effet de serre naturel induit par les rejets dans l'atmosphère d'un certain nombre de gaz, produits des activités humaines. Pour cette période, on peut retenir comme jalons la première Conférence mondiale sur le Climat en 1979 et la Conférence de Toronto en 1988. La première reconnaît le changement climatique comme *"a serious problem"*. A Toronto, l'accent est mis sur les effets adverses d'une dégradation de l'atmosphère et plus précisément sous l'angle des enjeux de sécurité globale, comme l'indique son intitulé : « *The Changing Atmosphere : Implications for Global Security* ». La déclaration finale retient notamment : *"Humanity is conducting an unintended, uncontrolled, globally pervasive experiment whose ultimate consequences could be second only to a global nuclear war"* et contient un ambitieux plan d'action¹ à destination des gouvernements, des industriels et des organisations internationales [PNUE/UNEP, 1993].

Cette même année, la création à l'instigation du G7 du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC/IPCC) - placé sous l'égide de l'Organisation météorologique mondiale (OMM/WMO) et du Programme des Nations unies sur l'environnement (PNUE/UNEP) avec pour mission d'éclairer les gouvernements en dressant un état des connaissances (et des incertitudes) scientifiques et techniques - marque une étape supplémentaire dans la reconnaissance par la communauté internationale du dossier climat. Cette reconnaissance est définitive au Sommet de la terre à Rio de Janeiro en 1992 où plus d'une centaine de gouvernements adoptent la Convention-cadre des Nations unies sur les changements climatiques (UNFCCC). Dans son objectif, la Convention climat inscrit la lutte contre les changements climatiques dans la perspective du développement durable et tente, 20 ans après la Conférence de Stockholm, de réconcilier les tensions entre l'empreinte de l'homme sur son environnement et les perspectives de développement. Même si le cahier des charges de la Convention n'est pas encore complet à cette date, elle pose les bases d'une action internationale coordonnée contre l'effet de serre. En particulier, elle contient un objectif, dessine les principes de l'action, élabore des recommandations à destination des Parties à la Convention, leur assigne des engagements et précise un ensemble de dispositions institutionnelles relatives à la prise de décision (Conférence des Parties - organe suprême de la Convention, Secrétariat, organe subsidiaire de conseil scientifique et technique, organe subsidiaire de mise en œuvre).

Le cycle de négociations franchit un tournant décisif en 1997 quand à la troisième Conférence des Parties à Kyoto (Japon) est adopté un protocole à la Convention qui contient les premiers engagements quantifiés juridiquement contraignants de réduction des émissions de gaz à effet de serre (GES). Bien sûr, le Protocole de Kyoto ne dit rien sur les engagements futurs au delà de la période 2008-2012 et le retrait des Etats-Unis en mars 2001 (au prétexte que les pays en développement ne se voyaient pas assigner d'engagements) peut faire douter de son efficacité environnementale si jamais il entre en vigueur. Néanmoins, le compromis de Bonn concrétisé à

¹Les recommandations incluent entre autres une réduction de 20% en 2005 des émissions de dioxyde de carbone (CO₂) par rapport à leur niveau de 1988 (objectif très ambitieux en comparaison des cibles provisoires de la Convention climat ou du Protocole de Kyoto), une amélioration de l'intensité énergétique d'au moins 10% en 2005 et l'appel à la préparation d'un cadre institutionnel pour lutter contre la dégradation de l'atmosphère.

Marrakech marque sur la scène internationale la volonté des Etats d'entreprendre des mesures en réponse à la prise de conscience des dangers du changement climatique.

Repères chronologiques du dossier Climat	
1979	La première Conférence Mondiale sur le Climat reconnaît que le changement climatique est ' <i>a serious problem</i> '.
80's	Série de conférences internationales soulignant les risques potentiels d'une perturbation par l'homme de l'atmosphère et des mécanismes du climat (ozone, pluies acides, émissions de gaz à effet de serre).
juin 1988	Conférence de Toronto « The Changing Atmosphere : Implications for Global Security ». Entre autres recommandations émises: réduction de 20% en 2005 des émissions de dioxyde de carbone (CO ₂) par rapport à leur niveau de 1988.
1988	Création à l'instigation du G7 du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC/IPCC) - placé sous l'égide de l'Organisation météorologique mondiale (OMM/WMO) et du Programme des Nations unies sur l'environnement (PNUE/UNEP) afin <i>i) d'évaluer les informations disponibles sur la science, les effets, les aspects socio-économiques et les options d'atténuation de l'évolution du climat et d'adaptation à cette évolution; ii) de rendre, sur demande, des avis scientifiques/techniques/socio-économiques à la Conférence des Parties à la Convention-cadre des Nations Unies sur les changements climatiques.</i>
1990	Premier rapport d'évaluation du GIEC.
juin 1992	Conférence des Nations unies sur l'environnement et le développement à Rio de Janeiro (Brésil). La Convention-cadre des Nations unies sur les changements climatiques est signée par 154 pays. Elle entre en vigueur le 21 mars 1994. A la fin de l'année 2002, 187 Etats (y compris l'Union Européenne) l'avaient ratifiée ou y avaient adhéré, s'engageant ainsi à en respecter les termes. Premier engagement quantifié de réduction des émissions pour les pays de l'Annexe I à la Convention climat : stabilisation conjointe ou individuelle des émissions de gaz à effet de serre au niveau de 1990 à la fin de la décennie (Article 3-2). Engagement non respecté.
1995	Deuxième rapport d'évaluation du GIEC. <i>"The balance of evidence suggests a discernible human influence on global climate"</i>
déc. 1997	Troisième session de la Conférence des Parties (COP3) à Kyoto (Japon). Adoption du Protocole de Kyoto qui impose aux pays développés (tels que identifiés à l'Annexe B au Protocole, c'est à dire les pays de l'OCDE en 1990 et les économies en transition d'Europe centrale et orientale) de réduire leurs émissions collectives de gaz à effet de serre d'au moins 5% (5,2% en réalité) en référence à l'année 1990 pour la période 2008-2012. Six gaz à effets de serre sont concernés : le dioxyde de carbone (CO ₂), le méthane (CH ₄), l'oxyde nitreux (N ₂ O), les hydrofluorocarbones (HFC), les hydrocarbures perfluorés (PFC) et l'hexafluorure de soufre (SF ₆). Le protocole contient des mécanismes d'échanges des droits précédemment définis, en particulier les trois mécanismes de flexibilité suivants : la mise en oeuvre conjointe (Article 6), le mécanisme de développement propre (Article 12) et le commerce des unités de réduction entre pays de l'Annexe B (Article 17).
mars 2001	L'Administration américaine fait part de son intention de ne pas ratifier le Protocole de Kyoto
juillet 2001	Accord de Bonn (COP6-bis). Après l'échec de COP6 (La Haye, PB - nov. 2000), l'accord trouvé à Bonn fait franchir un pas décisif à la Négociation climat en déclenchant les ratifications massives.
2001	Troisième rapport d'évaluation du GIEC. <i>"There is new and stronger evidence that most of the warming observed over the last 50 years is attributable to human activities"</i>

début 2004 En mars 2004, 120 Etats (y compris l'Union Européenne) ont ratifié le Protocole de Kyoto, représentant 44,2% des émissions de CO₂ des pays de l'Annexe I en 1990. L'Article 25 stipule que le Protocole entre en vigueur après la ratification « par 55 Parties à la Convention au minimum, parmi lesquelles les Parties visées à l'Annexe I dont les émissions totales de dioxyde de carbone représentaient au moins 55% du volume total des émissions de dioxyde de carbone de l'ensemble des Parties visées à cette annexe ». Les Etats-Unis ayant annoncé leur intention de ne pas ratifier le Protocole (36,1 % des émissions selon l'index de l'article 25), l'Australie (2,1%) de ne le ratifier qu'à la condition que les Etats Unis fassent de même, l'entrée en vigueur du Protocole est suspendue à une décision de la Russie (17,4%) et de l'Ukraine.

Sources : Climate change information sheet (n° 17-21) [PNUE/UNEP], site de la Convention climat (www.unfccc.int)

En même temps que se poursuit le processus diplomatique rythmé par les Conférences des Parties annuelles et les décisions de ratification, le changement climatique devient le sujet d'inquiétudes croissantes dans l'opinion publique : l'alerte scientifique aux gouvernements est relayée dans l'opinion au gré de l'actualité météorologique et des rapports scientifiques. Inquiétudes parce que d'une part, ces informations montrent l'étendue du phénomène en cours et d'autre part, elles donnent un avant-goût de ce que pourraient être les impacts d'un réchauffement plus prononcé au milieu du siècle. Ainsi, pour ne citer que quelques exemples, le Bulletin de l'OMM, largement repris dans la presse, rappelant que neuf des dix années les plus chaudes depuis 1860 sont toutes postérieures à 1990 (le record étant détenu par 1998), tendance qui s'inscrit dans le cadre d'un réchauffement (sans précédent par son rythme) de plus de 0,6°C sur le XX^{ème} siècle [OMM/WMO, 2002]. Des impacts sur la cryosphère : presque partout les glaciers marquent un net recul, en particulier les glaciers tropicaux qui sont les plus vulnérables au réchauffement. Ainsi, les neiges du Kilimandjaro ont fondu à grande vitesse : de 12 km² environ au début du siècle, l'extension du glacier est limitée aujourd'hui à 2 km²; si ce rythme est maintenu, il aura totalement disparu entre 2015 et 2020 [Thompson et al., 2002]. De même, les glaciers Alpains ont perdu en moyenne presque un tiers de leur masse et un à deux kilomètres de longueur pour les plus grands [Moreau, 2000]. De même, En parallèle, la publication récente d'analyses statistiques d'observations longues de la répartition et du comportement des espèces animales et végétales qui établissent des corrélations fortes entre tendance du réchauffement et évolution des écosystèmes [Parmesan et Yohe, 2003; Root et al., 2003]. Par exemple, [Root et al., 2003] établissent que pour plus de 80% des espèces observées dont la répartition (densité de population, aire d'implantation) ou la phénologie (éclosion des bourgeons, date de ponte) ont changé, ces modifications se sont opérées dans une direction prévisible étant donné nos connaissances sur leur biologie et les paramètres du climat. [Parmesan et Yohe, 2003], dans une étude plus approfondie, trouvent des résultats similaires et ont déterminé qu'en moyenne les espèces avaient migré sur le siècle de 6,1 km par décennie vers les hautes latitudes (6,1 m par décennie en altitude) et que la phénologie printanière avançait au rythme moyen de 2,3 jours par décennie². Enfin, retenons l'actualité

²La publication de ces résultats par certains auteurs du deuxième groupe de travail du GIEC en début d'année 2003 a donné lieu à une controverse au sein de cette communauté, rappelée par [Jensen, 2003]. Les termes de désaccord ont porté sur la conclusion qu'ont tirée [Parmesan et Yohe, 2003] et [Root et al., 2003] comme quoi leurs analyses mettaient en évidence l'empreinte (*fingerprint*) du changement climatique sur les écosystèmes. En effet, ces résultats établissent une corrélation entre réchauffement et réponse des espèces mais, compte tenu de la nature pluri-factorielle de cette réponse, ne peuvent en aucun cas caractériser une relation causale. Conscients de cette limite, [Parmesan et Yohe, 2003] ont également étudié les corrélations entre phases du réchauffement (qui n'est pas uniforme sur le siècle et comprend des périodes de réchauffement et de refroidissement) et comportement des espèces ; si le changement climatique a une grande influence sur les espèces étudiées, alors les

météorologique particulièrement chargée de l'année 2002 (inondations 'centennales' en Europe centrale (230 morts et des pertes estimées à 18,5 milliard US\$), vagues de chaleur aux Etats Unis, sécheresse en Australie parmi les plus graves qu'ait connues le continent) ou pour s'en tenir à la France en 2003, la canicule du mois d'août.

Le changement climatique n'est pas la première crise environnementale ni le premier cas de pollution diffuse de l'atmosphère à faire l'objet d'accord internationaux : ainsi le dossier de l'Ozone stratosphérique (Convention de Vienne, 1985, suivie du Protocole de Montréal, 1987) ou les très nombreux traités portant sur la pollution atmosphérique par des substances toxiques ou acidifiantes et leur transport à longue distance³. Néanmoins, chacune des dimensions du changement climatique, sans être particulièrement nouvelle, contribue par son interaction avec les autres caractéristiques du phénomène à en faire un objet original pour la prise de décision.

C'est d'abord un phénomène global avec une très grande hétérogénéité. Global, en ce sens que les émissions de GES contribuent à modifier la composition chimique de l'atmosphère et que les effets de cette perturbation se font ressentir à l'échelle de tout le globe⁴. L'accroissement des concentrations atmosphériques des GES est ainsi un mal collectif global. Global également en ce sens que le changement climatique entretient des liens étroits avec d'autres préoccupations environnementales (comme la désertification et la dégradation des sols, l'avenir de l'eau, la pollution de l'air en milieu urbain, les pluies acides, la réduction de la biodiversité...) qui sont déjà parfois l'objet de politiques publiques. Ces imbrications multiples posent le problème de l'articulation entre ces différentes politiques environnementales dans la perspective commune du développement durable. En particulier dans un contexte où les ressources financières ne sont pas illimitées, se pose la question de l'équilibre entre actions de réduction de la pollution (qui font par exemple que le changement climatique ne s'ajoute pas à la liste des facteurs aggravants qui menacent la disponibilité de la ressource en eau sur le continent Africain) et les actions d'adaptation envisagées dans le cadre de projets de développement (favoriser maintenant l'accès à l'eau potable en Afrique en intégrant au cours de l'élaboration des projets le risque climatique).

Il se caractérise en même temps par une très grande hétérogénéité : grand nombre de gaz impliqués, diversité des activités humaines produisant les émissions, hétérogénéité des émissions actuelles et futures de chaque pays et finalement hétérogénéité géographique des conséquences. La perturbation anthropique du climat est donc par nature un mal public produit de manière décentralisée et appelle par là à une action internationale coordonnée. En même temps, l'hétérogénéité des sources de GES pose des difficultés de régulation, le très grand nombre de parties impliquées de coordination, la distinction entre pays émetteurs et pays potentiellement affectés d'incitations à coopérer et de partage des coûts de réduction.

Sur ces points déjà, on peut constater les différences entre le dossier de l'effet de serre et le dossier de l'ozone. Si dans les deux cas il s'agit bien d'enjeux globaux, les substances

caractères observés doivent indiquer des réponses opposées au réchauffement et au refroidissement (*sign switching*). Dans tous les cas, les tests statistiques trouvent que l'hypothèse de *sign switching* est vérifiée à plus de 80% confirmant - sur les espèces étudiées - la dominance du changement climatique comme facteur explicatif. En tant que tels, nous sommes conscients de l'existence de cette controverse. Néanmoins nous utilisons ces résultats seulement pour montrer comment la détection d'un changement cohérent avec le signal climatique observé au XX^{ème} siècle peut faire l'objet d'inquiétudes dans l'opinion.

³Une liste assez exhaustive des traités internationaux à caractère environnemental est disponible par exemple dans [Watson et the Core Writing Team, 2001] (table 8.3, p. 134).

⁴Ce point n'est pas complètement vérifié pour tous les gaz contenus dans le panier du Protocole de Kyoto : autant le CO₂ se diffuse rapidement dans l'atmosphère (quelques jours) autant le dioxyde de soufre a une signature régionale très importante (c'est au plus un polluant transfrontalier mais pas mondial).

appauvrissant la couche d’ozone, quoique très nombreuses au demeurant, étaient limitées à certains usages industriels ou domestiques bien identifiés : gaz propulseurs, mousses isolantes et de structure, réfrigération, solvants et substances anti-incendie, pour ne citer que les plus importants. De même, tout le processus diplomatique depuis l’alerte scientifique au milieu des années 70 jusqu’à la signature du Protocole de Montréal en 1987 s’est construit sur une mesure commune et moyenne du risque sans entrer dans les questions de répartition géographique des impacts potentiels [*Hammitt, 1999*].

Ensuite le changement climatique est un problème qui se construit dans le temps. Le temps long de la nature tout d’abord. Par exemple, les GES ont des demie-vies atmosphériques qui s’étagent de 8 à 12 ans pour le méthane à 50 à 200 ans pour le dioxyde de carbone ; autrement dit, le climat des cinquante prochaines années est pratiquement déjà là. Le changement climatique est ainsi une externalité de stock affectée d’une très grande inertie. Les bénéfices de l’action (en termes de dommages évités) étant séparés dans le temps de ses coûts, les politiques climatiques impliquent donc de concevoir des transferts entre générations (quelle génération va supporter l’essentiel des efforts de mitigation et d’adaptation, quelles générations supporteront l’essentiel des dommages, comment se fait l’arbitrage croissance/environnement). Au temps long des systèmes naturels répond symétriquement le temps long des sociétés. Une fois encore, à la différence du cas de l’ozone stratosphérique, il n’existe pas aujourd’hui de substituts techniques acceptables à la fois d’un point de vue économique et d’un point de vue social. Infléchir les émissions suppose d’agir sur la demande d’énergie finale et sur l’offre et à chacune de ces actions est associé un temps caractéristique particulier: 1 à 10 ans pour améliorer l’intensité énergétique, 10 à 50 ans pour modifier la structure de l’offre énergétique, 30 à 100 ans pour réformer les infrastructures. Se pose donc la question de quand enclencher l’essentiel des efforts de réduction des émissions c’est à dire de l’articulation entre les objectifs de long-terme et les points de passage à court-terme (dont les engagements de Kyoto).

Troisièmement, le changement climatique fait peser l’éventualité de grands risques aux générations futures qui peuvent mettre en péril les conditions de subsistance de certaines populations: modifications de certains mécanismes du climat (cycles de la Mousson, remaniement de la circulation thermohaline, entre autres), transformations irréversibles du milieu (hausse du niveau des mers, extension des zones arides).

Enfin, le changement climatique est le lieu de toutes les incertitudes. Un peu plus de 10 ans après, la liste des résultats robustes et des incertitudes clefs du rapport de synthèse du GIEC [*Watson et the Core Writing Team, 2001*] montre qu’en dépit des progrès accomplis pour cerner les grandes lignes du problème, il subsiste de très grandes marges d’incertitude sur l’ampleur du phénomène et de ses conséquences, sur les perspectives de développement socio-économique (tendances démographiques, taux de croissance de l’économie, déploiement des techniques sans carbone) qui déterminent les profils d’émissions et conditionnent les coûts de réduction et les potentiels d’adaptation. En particulier, la question de l’attribution du changement climatique observé sur le XX^{ème} siècle ne reçoit toujours pas de réponse certaine⁵. Il s’agit pourtant d’un enjeu central au moins à double titre : d’une part, sur un plan scientifique, parce qu’une avancée sur ce point permettrait d’affiner nos capacités prédictives sur l’ampleur du réchauffement futur, et d’autre part, sur un plan politique, parce que l’efficacité environnementale de l’abattement n’est toujours pas certaine. Autrement dit, l’incertitude est présente à tous les maillons de la chaîne très complexe qui va des émissions aux impacts ; bien plus, elle s’amplifie au long de toutes les relations qu’elle comprend. Elle est en

⁵Sur ce point, le rapport de synthèse du GIEC indique « Most of observed warming over the last 50 years likely due to increases in greenhouse gas concentrations due to human activities » (Table SPM-3).

particulier de plus en plus prononcée plus on s'éloigne vers le long-terme et plus on descend vers de petites échelles géographiques.

Partant, tous les éléments sont réunis pour faire du dossier climat, après le cas de l'ozone et la crise du *Waldsterben*, un exemple de décision en univers controversé [Godard, 1999; Hourcade et al., 1992; Salles, 1993] : l'alerte scientifique est déclenchée mais l'incertitude sur les phénomènes est telle que l'on ne peut pour le moment en évaluer clairement les conséquences et les solutions techniques ne sont pas encore disponibles ou si elles le sont, c'est à des coûts prohibitifs ou au prix de mesures impopulaires dans l'opinion (on peut penser à la levée de boucliers des transporteurs routiers dès qu'on touche à la fiscalité sur les carburants).

Ces controverses prennent leur source à partir de vues divergentes sur un ensemble d'objectifs, de degrés d'interprétation et de principes, par exemple :

- dans la perspective d'un développement durable et d'une coopération internationale, les menaces du changement climatique justifient d'agir car les PVD seront vraisemblablement les plus menacés : mais certains argueront (comme [Lomborg, 2001]) qu'il est préférable de réduire la vulnérabilité au climat de ces régions et renforcer leurs capacités adaptatives à un éventuel changement climatique à l'aide de programmes de santé publique, d'amélioration de l'accès à l'eau, *etc.* plutôt que réduire à des coûts élevés les émissions de GES dans les pays industrialisés.
- la « responsabilité commune mais différenciée » ([UNFCCC, 1992], Art. 3, al. 1) peut donner cours à différentes interprétations selon les conceptions d'équité et de justice propres à chacun: responsabilité historique, participation au forçage radiatif additionnel, capacité à payer, allocation *per capita*... Et naturellement chacune d'elles influence la répartition des coûts de réduction des émissions.
- une certaine suspicion à l'égard des outils du calcul économique : prise en compte d'une succession de générations, valorisation des actifs environnementaux, évaluations des vies humaines, marchandisation de l'atmosphère (on peut le voir dans la manière dont les permis sont ressentis négativement par l'opinion).

En même temps, ces controverses peuvent être nourries par l'incertitude et les croyances divergentes sur les perspectives de croissance, l'évolution des techniques, l'ampleur du changement climatique et de ses conséquences, les progrès potentiels à échéance donnée des connaissances et des techniques. C'est par exemple la longue liste des négateurs du risque climatique, à commencer par [Lomborg, 2001]. Et chacun peut puiser dans ce vivier de propositions incertaines, les arguments défendant au mieux ses intérêts ou ses convictions personnelles : dès lors, le risque est grand soit de décider en toute méconnaissance de cause (parce que l'emporte le groupe qui a la rhétorique la plus séduisante) soit d'assister à un blocage de l'action (parce que chacun campe sur des positions difficilement conciliables).

Dans ce contexte, la Convention Climat ne trace pas de lignes directrices suffisamment fortes pour éviter l'émergence de controverses vives sur la réponse aux risques climatiques. Certes, dans une large mesure, ses principes se font l'écho des quatre caractéristiques essentielles du changement climatique que nous venons de présenter :

- en soulignant la nécessité d'une coordination internationale : coopération technique et financière, participation selon responsabilité commune mais différenciée.
- en replaçant la question de la réponse au changement climatique dans une perspective temporelle: en inscrivant le long-terme dans l'objectif de la Convention et en organisant les échéances, avec une première étape à court-terme, le Protocole de Kyoto.
- en retenant comme principe directeur pour encadrer les politiques climatiques dans un contexte incertain en présence de grands risques, le Principe de précaution⁶.

Cependant la réponse avancée par la Convention Climat, si elle est relativement claire dans ses intentions, ne possède pas de contenu opérationnel suffisamment robuste. L'objectif de la Convention esquisse ce que signifie un changement climatique *dangereux* en renvoyant aux questions de protection de la biodiversité, à la sécurité alimentaire, au développement durable mais s'abstient d'en fixer le niveau et en même temps de définir des trajectoires d'inflexion des émissions (un schéma directeur) vers cet objectif de long-terme. On peut ainsi assister à des débats vifs sur les deux questions centrales de l'action dans le cadre du dossier effet de serre : face à une menace hypothétique comme le changement climatique, quelle est la légitimité d'une action collective et si elle est entreprise, à l'aune de quels critères répartir dans le temps les efforts et distribuer entre régions les coûts des politiques climatiques, c'est à dire dans le cadre de la dynamique de la Convention Climat, quel est le bien fondé des engagements quantitatifs juridiquement contraignants contenus dans le Protocole de Kyoto.

Le Protocole de Kyoto se fonde en effet sur une vision subjective des risques climatiques, vision qui peut servir de fondement à deux attitudes opposées. D'un côté, les tenants de l'attentisme : il existe effectivement une menace potentielle induite par les rejets de GES, produits de l'activité humaine, mais l'étendue des incertitudes en ce domaine est telle qu'elle ne saurait justifier la mise en place de politiques agressives de réduction des émissions⁷ pour un risque qui peut s'avérer finalement anodin. Cette position part donc du principe qu'il existe un *regret* économique considérable à entreprendre dès aujourd'hui des efforts d'abattement. Il vaut mieux en revanche retarder les efforts de quelques décennies, durée pendant laquelle on peut espérer améliorer la compréhension des mécanismes à l'œuvre et affiner notre capacité prédictive, assurer le développement de techniques moins consommatrices d'énergie et favoriser la recherche dans le domaine des énergies renouvelables et poursuivre les investissements dans les pays les moins développés (qui seraient les plus vulnérables au changement climatique), ce qui renforcerait leur capacité d'adaptation si la menace climatique s'avérait fondée. Ces stratégies considèrent donc que le risque climatique même s'il est digne d'intérêt ne nécessite pas aujourd'hui de réponse spécifique mais qu'il doit être intégré dans des politiques déjà existantes - dont un produit ancillaire serait de renforcer notre capacité future d'action contre cette nuisance éventuelle. C'est d'ailleurs un des résultats majeurs des modèles intégrés - et parmi eux les modèles DICE [Nordhaus, 1994] et RICE [Nordhaus et Yang, 1996]

⁶ « Il incombe aux Parties de prendre des mesures de précaution pour prévoir, prévenir ou atténuer les causes des changements climatiques et en limiter les effets néfastes. Quand il y a risque de perturbations graves ou irréversibles, l'absence de certitude absolue ne doit pas servir de prétexte pour différer l'adoption de telles mesures [...] » ([UNFCCC, 1992], Article 3, alinéa 3).

⁷ Effectivement, les « engagements chiffrés de limitation ou de réduction des émissions » selon les termes officiels de l'Annexe B au Protocole de Kyoto (OCDE 90 et pays en transition de l'Europe de l'Est) sont assez ambitieux puisqu'il s'agit non pas d'une inflexion de la croissance des émissions de GES (ralentissement de la croissance-décrochage faible) mais d'une inversion de tendance (de la croissance à la décroissance - décrochage fort). En prenant pour base les données de [IEA, 2002] qui portent sur le seul CO₂, les rejets des pays de l'OCDE devraient atteindre 12,5 GtCO₂ - soit en excès de 2,8 GtCO₂ (29%) par rapport à l'objectif de Kyoto.

- qui recommandent un effort modeste de réduction des émissions, au moins pendant les premières décennies [Kelly et Kolstad, 1999]. Sur un plan davantage théorique, ces résultats sont entre autres confirmés par les analyses de [Manne et Richels, 1992] et [Kolstad, 1996].

De l'autre côté, les partisans d'une action immédiate en raison de l'éventualité de grands risques (ralentissement ou interruption de la circulation thermohaline dans l'Atlantique Nord, modification de la mousson, hausse du niveau des mers, modification du cycle de l'eau), risques dont les conséquences sont irréversibles au moins sur plusieurs générations. C'est donc là un *regret* environnemental significatif qui sert de fondement à cette attitude. Ce discours met également en avant le risque de bifurcations dans les choix de développement des systèmes énergétiques ou les décisions d'aménagement du territoire et l'existence de barrières sociales et économiques à l'adoption de nouvelles techniques ou de changement de mode de vie, deux facteurs qui peuvent augmenter de manière significative les coûts de réduction des émissions si les décisions sont reportées. Par ailleurs, ce discours souligne toute l'incertitude sur le développement des techniques et tempère les visions très optimistes des attentistes, qui placent beaucoup d'espoir dans le futur (progrès de la connaissance et des techniques).

D'une manière ou d'une autre, on peut voir ces controverses comme cristallisant autour de la question de l'évaluation des bénéfices des politiques climatiques : qu'il s'agisse des articulations entre changement climatique et développement (meilleure allocation des ressources), du timing des efforts et de l'équité intergénérationnelle (quelles sont les générations qui supportent le fardeau des efforts ?) ou de la répartition d'un budget carbone entre régions (équité intragénérationnelle) compte tenu des dommages estimés actuels et futurs. Toutes ces questions renvoient nécessairement à une mesure des dommages climatiques à mettre en balance avec une évaluation des coûts des politiques climatiques ou des allocations alternatives des montants financiers importants impliqués. Or nous sommes loin de disposer de telles estimations et surtout en l'état, les quelques chiffres disponibles sont peu fiables et très controversés. Ce qui n'est pas sans poser de problème dans le cadre d'une négociation où il est nécessaire que les décisions reposent sur des bases scientifiques minimales relativement robustes, comprises et ayant reçues l'agrément de toutes les parties.

On peut le voir à partir des développements précédents, pour décider aujourd'hui de l'effort de réduction des émissions face à une menace de long-terme, il faut surmonter trois difficultés :

- l'existence d'un déséquilibre entre une petite fenêtre d'action à court-terme et les dynamiques naturelles et socio-économique à long-terme, avec le risque de mal-représenter comment les décisions d'aujourd'hui pourraient verrouiller de manière irréversible l'évolution du climat, des écosystèmes ou des sociétés dans des configurations défavorables (sociétés à profil d'émissions élevé, forte vulnérabilité au changement climatique). Il faut donc être en mesure de replacer la décision dans une perspective temporelle en séparant décision de court-terme et décision à plus longue échéance.
- une cascade d'incertitude, depuis les déterminants socio-économiques des scénarios d'émissions jusqu'aux dommages climatiques, avec les croyances divergentes qu'elle nourrit. Il faut donc d'une part, réussir à rassembler les différentes croyances, et d'autre part, être en mesure de hiérarchiser les incertitudes selon l'horizon de décision et représenter l'amélioration des connaissances et ses liens avec le processus de décision.

- l'absence d'une information claire sur les menaces du changement climatique pour organiser la décision. Il faut donc recourir, au-delà des évaluations des dommages actuellement disponibles et de l'analyse coût-bénéfice, à plusieurs mesures des bénéfices des politiques climatiques et aux cadres d'analyse de la décision qui leur correspondent pour comparer leurs recommandations avant d'en tirer des conclusions définitives pour l'action collective.

C'est cette grille d'analyse qui va nous accompagner au long de cette thèse dont l'objet est d'examiner l'amplitude et le calendrier des efforts de réduction des émissions de CO₂ (à l'échelle globale), en particulier à plus court-terme avec la question centrale : vaut-il mieux anticiper les efforts ou les retarder ? Nous entreprendrons plusieurs exercices numériques pour en tirer des leçons pour l'action compte tenu de la cascade d'incertitude à laquelle nous faisons face aujourd'hui, et pour hiérarchiser ces incertitudes, en calculant la valeur de l'information qui leur est associée. Ainsi nous pourrions examiner sous quelles hypothèses une position donnée face aux risques climatiques (l'inaction, par exemple) est fondée d'un point de vue scientifique et économique.

A cette fin, nous ferons appel à différentes mesures du risque climatique en balayant la chaîne causale émissions - concentrations - température - impacts - dommages, depuis la plus imparfaite (mais la plus aisément évaluable), à savoir les concentrations, jusqu'aux plus proches de l'idéal théorique (mais les plus difficilement évaluables) que sont les fonctions dommages. Ce faisant nous allons croiser sur notre route les différents cadres d'analyse de la décision dans lesquels elles sont incorporées et nous pourrions comparer les recommandations auxquelles chacun d'entre eux aboutit. Pour ce faire, nous emploierons des modèles de contrôle optimal et nous pourrions examiner comment ils participent au processus de décision collective, en particulier comment ils permettent de poser les bases d'un discours rationnel dans un contexte de décision sous controverse pour faciliter l'émergence de compromis entre acteurs possédant des visions du monde divergentes : c'est l'éthique du *audi alteram partem* définie par [Hourcade, 1992]. Ces modèles sont souvent présentés comme des plate-formes favorisant l'échange entre la communauté scientifique, les décideurs et les parties prenantes et en effet, ils permettent de réunir dans une structure organisée une grande masse de connaissances scientifiques et de la mettre en relation avec les objectifs des politiques. Plus spécialement, ils forcent l'analyste i) à identifier les canaux par lesquels le changement climatique impacte effectivement sur le bien-être des populations et permettent d'explorer les conséquences des politiques climatiques ; ii) à expliciter les différents choix éthiques entrepris (modes d'agrégation à l'intérieur d'une génération, prise en compte des générations futures) et les attitudes face au risque qui sont représentées ; iii) à intégrer l'incertitude et à caractériser les paramètres-clés pour la décision.

Trois premiers chapitres sont consacrés à l'examen sous différents angles les liens entre incertitude sur l'amplitude du changement climatique et l'étendue de ses impacts et modes d'analyse des politiques climatiques :

- au chapitre I, nous montrons qu'en l'état notre connaissance des risques climatiques reste très limitée et que les évaluations des dommages aujourd'hui disponibles sont trop fragiles pour éclairer la décision collective. Partant, pour évaluer les politiques climatiques dans l'attente d'une mesure fiable et non controversée de ces risques, on est renvoyé à une série d'indicateurs qui sont autant d'approximations successives d'une fonction de dommages encore inconnue. Le choix d'un de ces indicateurs dépend d'un arbitrage entre précision avec laquelle peuvent être décrits les bénéfices des politiques

climatiques et pertinence en regard des questions que se posent les décideurs ; son intégration dans un cadre d'analyse de la décision dépend, elle, du fait qu'on accepte ou pas la valorisation des conséquences socio-économiques des impacts du changement climatique.

- au chapitre II, nous présentons les différentes sources d'incertitude à l'œuvre pour identifier leur origine, cerner les difficultés que pose son traitement dans les modèles intégrés et examiner leurs implications vis à vis du problème de décision. En particulier, nous avons souligné que le changement climatique relève des situations de décision en univers controversé, avec le risque d'adopter une attitude de court-terme qui ne soit pas en proportion avec les réalités d'une menace de long-terme ou d'assister à une paralysie des cycles de négociations, chaque partie campant sur des positions peu conciliables. Ce chapitre se conclut sur la nécessité d'une approche séquentielle à la décision pour surmonter ces deux écueils.
- au chapitre III, nous examinons comment elle y parvient effectivement en organisant les termes du débat dans une perspective temporelle, entre temporalité des décisions et temporalité de l'arrivée de nouvelles connaissances, et en introduisant une préférence pour la flexibilité, comment les décisions présentes menacent ou préservent les options futures. C'est ainsi un cadre d'analyse qui intègre les deux composantes du Principe de précaution, la flexibilité et un contexte d'information croissante, et permet de surmonter certaines controverses en considérant diverses croyances et en hiérarchisant leur impact sur la décision.

L'objectif des trois chapitres suivants est d'examiner sur la base de la discussion précédente comment les différentes attitudes face au risque climatique présentées au chapitre I se traduisent en recommandations pour l'action : en retenant des mesures des risques climatiques de plus en plus tangibles, jusqu'à cette mesure idéale que sont les fonctions de dommages, et en considérant explicitement la combinaison des incertitudes dans leur évaluation. En suivant une approche séquentielle, nous pourrions comparer les recommandations politiques issues des modèles de plus en plus complexes qui utilisent ces différentes mesures des bénéfices des politiques climatiques : faut-il ou non agir à court-terme ?; quelles sont les incertitudes importantes pour cette fenêtre de décision ?; comment se hiérarchisent les incertitudes sur les scénarios d'émissions, sur la dynamique du climat et sur la vulnérabilité des écosystèmes et des activités et implantations humaines ?

Pour nous assurer de la comparabilité des résultats, toutes les simulations sont conduites à partir de modèles de contrôle optimal appartenant à la famille *RESPONSE*, sur la base d'hypothèses harmonisées. Le modèle *RESPONSE* est un modèle intégré du changement climatique qui appartient à la catégorie des modèles d'optimisation des politiques climatiques. Comme nous étudierons les questions d'agenda des efforts de réduction - en nous concentrant sur la réponse optimale de court-terme, nous utiliserons une version agrégée du modèle qui comprend une description des coûts d'abattement, prenant en compte un facteur de progrès technique autonome et l'inertie socio-économique qui intervient comme multiplicateur des coûts, un modèle simplifié du cycle du carbone et de la réponse du climat. Le scénario de croissance (profil démographique, hypothèses sur le progrès technique et niveau de revenu) comme les émissions de GES sont exogènes au modèle et sont tirés du marqueur de la famille de scénario SRES A1 [Nakicenovic, 2000].

Nous rencontrerons ainsi :

- au chapitre IV, le modèle *RESPONSE_Θ* (Θ pour température) pour traduire la première attitude, où l'on considère que l'incertitude sur l'évaluation des impacts et des dommages étant aujourd'hui trop importante pour accueillir avec suffisamment de confiance les estimations qui circulent actuellement, les bénéfices des politiques climatiques prennent donc la forme de contraintes. *RESPONSE_Θ* est ainsi un modèle coût-efficacité qui cherche à minimiser la somme actualisée des coûts d'abattements compte tenu de contraintes sur l'amplitude et le rythme de l'évolution de la température moyenne globale ;
- au chapitre V, le modèle *RESPONSE_Π* (Π pour préférence pour le régime climatique actuel) pour traduire la deuxième attitude, où tout en restant sceptique sur les évaluations des dommages, on accorde plus de confiance aux résultats des modèles climatiques. On utilise un indicateur du changement climatique en cours comme proxy d'une description quantitative des dommages. *RESPONSE_Π* c'est un modèle résolu en mode coût-bénéfice qui cherche à maximiser une fonction d'utilité inter-temporelle qui dépend du niveau de consommation courante et de la qualité du climat ;
- au chapitre VI, le modèle *RESPONSE_Δ* (Δ pour dommages) pour la troisième attitude, où bien que conscient des limites des évaluations des dommages, on recourt à une représentation explicite des dommages climatiques pour introduire des éléments de rationalité dans les controverses sur les risques. *RESPONSE_Δ* est un modèle résolu en mode coût-bénéfice qui cherche à maximiser l'utilité intertemporelle dérivée de la consommation courante diminuée des coûts d'abatement et des dommages résiduels.

Références bibliographiques

- Godard, O. (1999). De l'usage du principe de précaution en univers controversé, *Futuribles* (239-240), 37-60.
- Hammitt, J.K. (1999). Evaluation endpoints and climate policy: atmospheric stabilisation, benefit-cost analysis and near-term green-house gas emissions, *Climatic Change*, 41, 447-468.
- Hourcade, J.C. (1992). L'effet de serre: des bons et mauvais usages d'une provocation, *Etudes* (mai), 635-645.
- Hourcade, J.C., J.-M. Salles et D. Théry (1992). Ecological economics and scientific controversies: Lessons from some recent policy making in the EEC., *Ecological Economics*, 6, 211-233.
- IEA (2002). *World Energy Outlook*, OECD/IEA, Paris.
- Jensen, M.N. (2003). Consensus on Ecological Impacts Remains Elusive, *Science*, 299, 38.
- Kelly, D. et C.D. Kolstad (1999). Integrated assessment models for climate change control, in *Yearbook of environmental and resource economics 1999/2000*, Folmer et Tietenberg (dir.), p 171-197.
- Kolstad, C.D. (1996). Learning and stock effects in environmental regulation: the case of greenhouse gas emissions, *Journal of Environmental Economics and Management* (31), 1-18.
- Lomborg, B. (2001). *The Skeptical Environmentalist: measuring the real state of the world*, 540 p, Cambridge University Press, Cambridge (UK&US).

- Manne, A.S. et R. Richels (1992). *Buying Greenhouse Insurance: The Economic Cost of CO₂ Emissions limits*, MIT Press, Cambridge (MA).
- Moreau, L. (2000). Observe-t-on déjà les effets du réchauffement climatique dans les Alpes?, Actes du colloque *Les changements climatiques et leurs incidences sur le milieu montagnard*, Chamonix (France), 29-30 juin 2000.
- Nakicenovic, N. (dir.) (2000). *Special Report on Emissions Scenarios: a special report of Working Group III of the Intergovernmental Panel on Climate change*, Cambridge University Press, Cambridge (UK&US).
- Nordhaus, W. (1994). *Managing the Global Commons: the Economics of Climate Change*, MIT Press, Cambridge(MA, USA).
- Nordhaus, W. et Z. Yang (1996). RICE:A Regional Dynamic General-Equilibrium Model of Alternative Climate-Change Strategies, *American Economic Review*, 86 (4), 741-765.
- OMM/WMO (2002). *Déclaration de l'OMM sur l'état du climat mondial en 2001*, OMM - n°940, OMM/WMO, Genève (Switzerland).
- Parmesan, C. et G. Yohe (2003). A globally coherent fingerprint of climate change impacts across natural systems, *Nature*, 421, 37-42.
- PNUE/UNEP. *Climate Change Information Sheet*, <http://www.unep.ch/iuc/submenu/infokit/>.
- PNUE/UNEP (1993). *The Toronto and Ottawa conferences and the 'Law of the Atmosphere'*, <http://www.unep.ch/iucc/fs215.html>.
- Root, T.L., J.T. Price, K.R. Hall, S.H. Schneider, C. Rozenzweig et A. Pounds (2003). Fingerprints of global warming on wild animals and plants, *Nature*, 421, 57-60.
- Salles, J.-M. (1993). *Décisions économiques et gestion collective des risques globaux d'environnement*, Thèse de doctorat, EHESS.
- Thompson, L.G., E. Mosley-Thompson, M.E. Davis, K.A. Henderson, H.H. Brecher, V.S. Zagorodnov, T.A. Mashiotta, P.-N. Lin, V.N. Mikhalenko, D.R. Hardy et J. Beer (2002). Kilimanjaro Ice Core Records: Evidence of Holocene Climate Change in Tropical Africa, *Science*, 298, 589-593.
- UNFCCC (1992). *Convention-cadre des Nations Unies sur les changements climatiques (UNFCCC)*.
- Watson, R.T. et the Core Writing Team (dir.) (2001). *Climate change 2001: synthesis report*, 398 p, Cambridge University Press, Cambridge (UK) and New York (NY, USA).

Chapitre I

Evaluer les dommages :
une *science* en gestation ?

CHAPITRE I EVALUER LES DOMMAGES : UNE <i>SCIENCE</i> EN GESTATION ?	1
I. Les vecteurs de la transformation des impacts en dommages : un essai de cadrage	7
I.1. Dégradation de la productivité du capital naturel et du facteur humain	10
I.1.1. Changement climatique et vulnérabilité des productions agricoles	11
I.1.2. Changement climatique et disponibilité des ressources en eau	12
I.1.3. Changement climatique et tourisme de montagne	13
I.1.4. Changement climatique et accroissement des risques pour la santé humaine	15
A. Influences directes de la température	15
B. Changement climatique et qualité de l'air en ville	15
C. Le cas des maladies à vecteur	16
I.2. Accélération de l'obsolescence du capital productif et des infrastructures	17
I.2.1. Une vulnérabilité accrue due à une plus grande fréquence des événements météorologiques extrêmes	17
I.2.2. Hausse du niveau des mers et vulnérabilité des territoires insulaires et des régions côtières	19
I.2.3. Dégel permanent ou saisonnier du permafrost dans les zones montagneuses et boréales	21
I.3. Altération des aménités fournies par l'environnement	22
I.3.1. L'ensemble des 'satisfactions' présentes et futures que peut prodiguer l'environnement	22
I.3.2. L'ensemble des facteurs qui contribuent à une aversion spécifique au risque d'une rupture de l'environnement, conséquence d'une évolution (défavorable) du climat	23
I.4. Effets de propagation et inflexion des sentiers de croissance	25
II. Les dommages au risque de l'évaluation	29
II.1. Un bref historique de l'évaluation des dommages du changement climatique	29
II.1.1. Une première génération de travaux	29
II.1.2. Les trois études de la seconde génération	32
II.2. Evaluer les dommages, apprécier les risques : des estimations incomplètes, incertaines et très controversées	38
II.2.1. Des évaluations ponctuelles	38
II.2.2. Des évaluations selon une procédure statique	39
II.2.3. Des évaluations lacunaires et très approximatives	40
II.2.4. Des évaluations très incertaines et difficilement comparables	41
A. Vulnérabilité et adaptation	42
B. Précision régionale et sectorielle des études et comparabilité des estimations	43
C. Les difficultés de la valorisation monétaire	45
D. Evaluation de l'incertitude	48
III. Les difficultés que posent le choix d'une mesure des bénéfices des politiques climatiques	51
III.1. La nécessité d'une métrique commune des bénéfices des politiques climatiques	51
III.2. Or pour le moment ces bénéfices sont incommensurables	52
III.2.1. L'incertitude au cœur des controverses	53
III.2.2. Croyances, positions éthiques et controverses	53
III.3. Le choix d'une métrique : un arbitrage entre précision et pertinence	60
Conclusion	64
Références bibliographiques	67

Table des figures

Figure I-1. Changement climatique et risques en 2100 : une approche qualitative	7
Figure I-2. Dommage mondial (en % du PIB mondial) par catégories d'impact, pour deux types d'agrégation (Source : [Nordhaus et Boyer, 1999]).....	35
Figure I-3. Dommage mondial (en % du PIB mondial) par région, pour deux types d'agrégation (Source : [Nordhaus et Boyer, 1999]).	35
Figure I-4. Modification moyenne des précipitations sur l'Europe et l'Afrique de l'Ouest.	44
Figure I-5. Incertitudes sur le réchauffement au moment du doublement de la concentration atmosphérique de CO ₂	49
Figure I-6. Inégale répartition du revenu mondial, inégale vulnérabilité au changement climatique	56
Figure I-7. Dommages régionaux et transferts	59
Figure I-8. Du coût-efficacité au coût-bénéfice, un arbitrage entre Précision et Pertinence	61

Table des encadrés

Encadré I-1. Un modèle heuristique.....	9
Encadré I-2. Changement climatique et secteur de l'assurance	18
Encadré I-3. Agréger les estimations régionales des dommages : l'équité en perspective	56

Table des tableaux

Tableau I-1. Evaluation monétaire des impacts pour l'économie américaine au moment du doublement de la concentration atmosphérique de CO ₂ (montants annuels exprimés en milliards de dollars, année de référence 1990).....	30
Tableau I-2 Dommages exprimés en termes monétaires, résultant d'un doublement de la concentration de CO ₂ dans les différentes régions du monde (dommages annuels).....	32
Tableau I-3. Estimations régionalisées des impacts du changement climatique : montants annuels exprimés en % du PIB régional	33

La Convention cadre des Nations unies sur les changements climatiques retient comme objectif d'empêcher « *toute perturbation anthropique dangereuse du système climatique (...) dans un délai suffisant pour que les écosystèmes puissent s'adapter (...), que la production alimentaire ne soit pas menacée et que le développement économique puisse se poursuivre d'une manière durable* » [UNFCCC, 1992]. Objectif aux contours vastes, qui inscrit la lutte contre les changements climatiques dans le cadre des problématiques du développement durable : protection de la biodiversité, lutte contre la faim et la pauvreté, droits des générations futures. Objectif au caractère remarquablement flou, puisque à la suite des auteurs du Troisième rapport d'évaluation du GIEC [McCarthy et al., 2001], force est de constater que plus de dix ans après le Sommet de la terre à Rio, il est toujours impossible de définir de manière univoque le vocable *dangereux*. Définir parce que notre connaissance à ce jour encore très incertaine de l'ampleur du changement climatique et de ses conséquences ne nous permet pas d'envisager jusqu'à quel point nous en serons affectés ; *de manière univoque* parce que définir à partir de quel degré le risque climatique devient inacceptable (et dès lors constitue un danger) fait appel à des jugements de valeur, très divers selon les individus et les sociétés auxquelles ils appartiennent. Ces jugements de valeurs reflètent, entre autres, l'importance que nous attachons à la préservation des écosystèmes, les liens de solidarité que nous entretenons à l'égard des régions vulnérables ou de nos descendants, notre optimisme ou notre pessimisme devant l'étendue des impacts et nos capacités d'adaptation, ou encore notre degré d'aversion au risque face à de grandes ruptures du climat tel que nous le connaissons.

C'est la raison pour laquelle le GIEC dans son Rapport de synthèse [Watson et the Core Writing Team, 2001], se refuse à porter tout jugement de valeur en définissant précisément des seuils de danger. Il s'en tient à une synthèse très générale des connaissances éparses dont nous disposons aujourd'hui sur les impacts d'un réchauffement potentiel à la fin du XXI^{ème} siècle en présentant son incidence pour cinq motifs de préoccupation, qui traduisent certaines de ces valeurs : risques pour les écosystèmes, risques associés à un possible accroissement des événements météorologiques extrêmes, distribution des risques, risques à l'échelle globale et risques de discontinuités majeures (Figure I-1).

Il s'agit donc d'une approche très qualitative qui donne un aperçu de certains des risques induits par le changement climatique. Mais force est de constater qu'elle ne donne aucune information d'ordre économique pour façonner les politiques climatiques, en particulier aucune mesure des bénéfices de l'action à mettre en balance avec les coût des politiques de réduction des émissions de GES et d'adaptation au changement climatique. Pourtant, au fur et à mesure que la Convention Climat devient une réalité - nonobstant le retrait des USA et les attermoissements de la Russie, les débats sur la justification des niveaux auxquels stabiliser les concentrations à long-terme et sur la répartition régionale des efforts se font plus pressants, ce qui conduira à prendre le risque de l'évaluation des dommages climatiques malgré les difficultés persistantes signalées par le GIEC ([McCarthy et al., 2001], chp. XIX) et reprises par un certain nombre d'auteurs [Cline, 1992; Fankhauser, 1994; Smith et Hitz, 2002; Tol et al., 2000].

Il convient ici de bien distinguer deux types d'efforts. Le premier porte sur l'évaluation des conséquences d'un scénario de réchauffement sur les écosystèmes, les activités productives et les implantations humaines : ainsi, les résultats du projet ACACIA [Parry, 2000] pour des travaux régionaux à l'échelle européenne, le National Assessment of Climate Change (NACC) aux Etats Unis¹ et bien sûr la somme que constitue la contribution du deuxième groupe de

¹A l'initiative du programme fédéral *United States Global Change Research Program* (USGCRP). Une présentation détaillée, des résultats récents des études sectorielles ou régionales et une liste des publications sont accessibles à l'adresse <http://www.usgcrp.gov/usgcrp/nacc/default.htm>.

travail au troisième rapport du GIEC [McCarthy et al., 2001], où le lecteur peut trouver une abondante revue de littérature des études globales, sectorielles ou régionales disponibles. Ces travaux, dont le nombre s'accroît sans cesse, permettent de brosser à grands traits un tableau de la vulnérabilité de certains secteurs de l'économie ou d'une région donnée du globe, d'identifier des potentiels techniques d'adaptation et de proposer une évaluation des impacts résultants. Soulignons qu'il s'agit d'une masse d'informations spécialisées (on se concentre sur les impacts pour les productions agricoles ou à l'échelle d'une région) et extrêmement hétérogènes (les impacts y sont exprimés dans des unités très variées et les hypothèses sur les perspectives socio-économiques et les scénarios de changement climatique sont loin d'être systématiquement comparables). Le second type d'efforts vise précisément à rassembler et à homogénéiser ces informations de nature physique (hausse du niveau de la mer, changement dans le rendement des cultures, violation de standards de qualité de vie –stress hydrique, sécurité alimentaire-, dégradation d'indices de biodiversité, etc.) pour les traduire dans une métrique commune, monétaire, dans le but d'écrire des fonctions de dommages qu'on pourra comparer au coût des politiques d'adaptation et de réduction des émissions.

En raison des très grandes incertitudes qui entourent les phénomènes à l'œuvre, très peu d'économistes se sont risqués à ce calcul fort hasardeux et aujourd'hui, seulement trois études récentes donnent par grande région du monde et par secteur d'activité une évaluation économique des impacts du changement climatique [Mendelsohn et al., 2000; Nordhaus et Boyer, 1999; Tol, 1999a, b]. Ces travaux pionniers ont ainsi mis en perspective un ensemble très disparate d'études d'impacts régionales ou sectorielles pour proposer un tableau mondial et cohérent des visages du changement climatique et de ses conséquences, évaluées selon une métrique monétaire. Mais leurs résultats restent très fragiles car tout un travail reste à faire sur l'information de base qui supporterait des évaluations robustes. Il y a en effet loin de la science des impacts à la science des dommages et nous ne prétendons pas combler ce fossé dans le cadre de ce chapitre introductif. En revanche, nous nous efforcerons de clarifier la nature des déterminants de la transformation des impacts aux dommages afin de mieux appréhender les risques que fait peser le changement climatique et comprendre pourquoi les évaluations des dommages actuellement disponibles sont peu satisfaisantes.

Pour ce faire, une première section sera consacrée à l'exposé d'un modèle heuristique à même de présenter les différents chemins qui conduisent des impacts aux dommages pour donner un aperçu des conséquences potentielles du changement climatique et lever les ambiguïtés persistantes qui entourent ces deux notions. Dans une deuxième section, cette distinction nous permettra de souligner les limites actuelles du traitement des dommages dans les modèles intégrés et montrer qu'à bien des égards nous ne disposons pour le moment que d'une information très parcellaire, incertaine et controversée sur les risques. Pourtant, on ne peut attendre pour décider de l'attitude à adopter – éventuellement l'inaction - que la question des dommages soit résolue au terme d'une expérience de plein champ. C'est la raison pour laquelle la discussion sur l'application du Principe de précaution au cas de l'effet de serre se fait sur la base d'indicateurs qui sont autant d'approximations successives d'une fonction de dommages encore inconnue, indicateurs dont les modalités de choix seront exposées dans la troisième section.

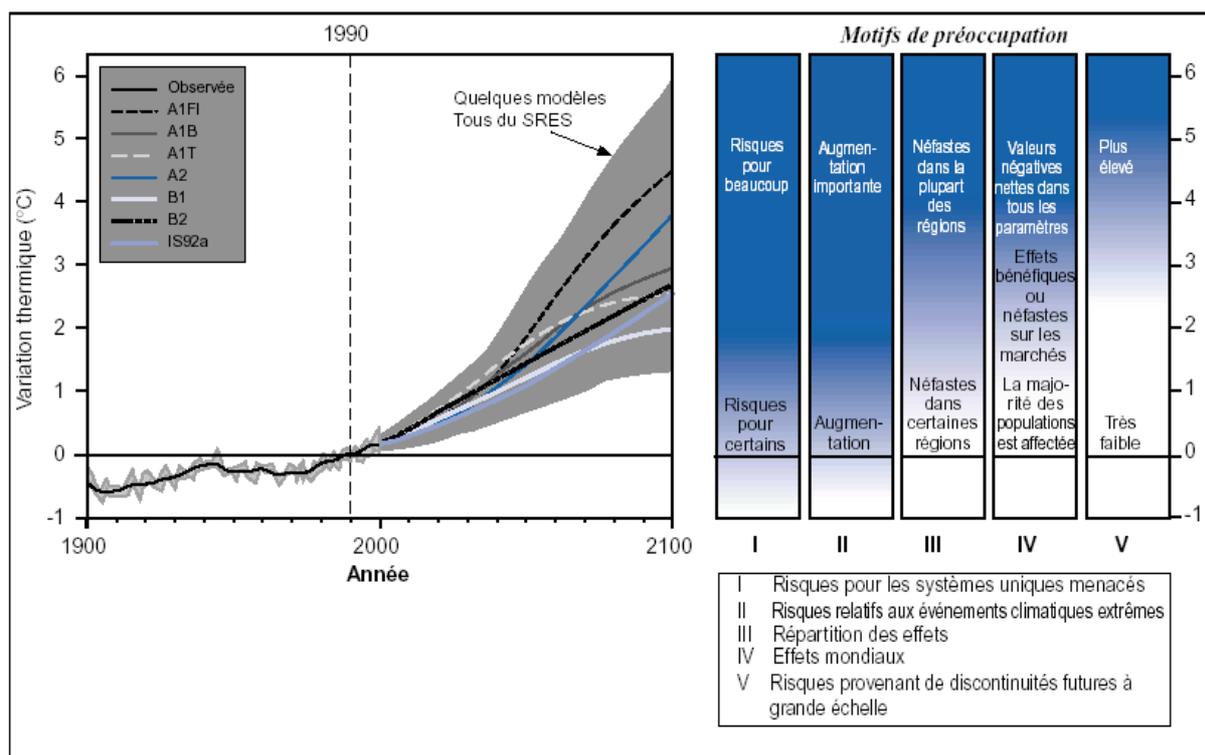


Figure I-1. Changement climatique et risques en 2100 : une approche qualitative

La partie gauche de la figure présente, en référence à 1990, les variations observées de la température moyenne globale au XX^{ème} siècle et la fourchette des estimations du réchauffement au XXI^{ème} siècle, selon les résultats du premier Groupe de travail du GIEC pour les scénarios SRES. Elle montre entre autres les très grandes incertitudes en présence (socio-économiques et climatiques) qui pèsent sur notre capacité prédictive à long-terme. La partie droite de la figure présente, en retenant comme indicateur du changement climatique l'élévation de la température moyenne globale, une interprétation qualitative des risques induits par l'évolution du climat à l'horizon 2100 pour cinq motifs de préoccupation. Les incidences ou les risques neutres ou faiblement négatifs ou positifs sont indiqués en blanc, les incidences négatives pour quelques systèmes ou les risques faibles sont indiqués en bleu clair, et les incidences négatives ou les risques plus répandus et/ou de plus grande ampleur sont indiqués en bleu foncé. Source : [McCarthy et al., 2001], SPM Figure SPM-2.

I. Les vecteurs de la transformation des impacts en dommages : un essai de cadrage

Un dommage est la variation négative de bien-être des populations provoquée par les rétroactions des changements climatiques sur les systèmes naturels et l'activité humaine. Evaluer une telle variation renvoie à la fois aux canaux par lesquels le système économique pourrait être affecté, c'est à dire l'ensemble des impacts et de leur diffusion dans les tissus économiques, sociaux et environnementaux, mais aussi à des jugements de valeur ou des choix éthiques, dont la formulation est souvent controversée: comment déterminer les pertes et gains en bien-être d'une translation à Deauville du climat de Biarritz ?; quelle valeur donner à la préservation des Babouins Gelada (derniers représentants d'un genre de primates herbivores jadis prospère) ou à celle des récifs coralliens pour empêcher le changement climatique de s'ajouter à la liste des facteurs qui les menacent?; comment évaluer le coût des *climate change refugees* [Parry, 1999] ou des aides destinées à garantir la sécurité alimentaire des populations vulnérables et à préserver l'environnement dans lequel elles sont inscrites?; comment intégrer les risques de propagation de chocs locaux?

Pour répondre à ces questions, il faut adopter une vision d'ensemble des phénomènes d'amplification ou de compensation au sein du système Economie/Environnement/Société. A cette fin, nous partons d'un modèle à visée heuristique (Encadré I-1) à même de capturer les relations entre changement climatique et bien-être des populations. Il s'agit de présenter par quels mécanismes le changement climatique peut induire une variation de bien-être et identifier quelles variables explicatives, quelles représentations des activités économiques et de l'environnement sont les plus pertinentes pour traiter de la question des dommages. Pour le moment, l'objectif étant de pointer les déterminants-clefs qui conduisent aux dommages, nous n'essaierons pas de définir la forme des relations mises en évidence.

Le modèle présenté à l'Encadré I-1 est construit sur la base d'un modèle de croissance régionalisé de type Ramsey avec prise en compte d'une externalité de stock. Il peut s'interpréter à travers la métaphore d'un planificateur bienveillant [Hourcade et al., 2002; Lecocq et Hourcade, 2003] qui cherche à maximiser le bien-être des populations présentes et futures (1). Ici, l'utilité des agents, $U(.)$, dépend du niveau de consommation d'un bien composite (C) et des satisfactions, beaucoup plus subjectives, retirées de la qualité de l'environnement (E), perçue comme *pure* source d'aménités. Les coefficients α et ρ sont utilisés pour agréger (et comparer) les utilités des agents représentatifs de chaque région à chaque génération. Ils traduisent les positions morales adoptées par le planificateur relativement à la distribution du revenu à l'intérieur d'une génération et entre générations. Ces différentes visions de l'équité possibles que retiendra le planificateur correspondent à autant de mandats qui lui sont donnés par les parties en présence pour coordonner les politiques climatiques. [Lecocq et Hourcade, 2003] par exemple identifient deux grandes motivations constitutives de ces mandats (et qui se répercuteront sur les pondérations des régions et des générations dans la fonction objectif du planificateur) : des raisons d'ordre diplomatique (selon les l'influence des différentes nations dans le contexte des relations multilatérales²) et des raisons d'ordre éthique (selon les différentes conceptions de la solidarité intergénérationnelle en face des risques climatiques³).

La colonne de gauche représente par des équations simples le processus de croissance économique reposant sur :

- des fonctions de production (2) dépendant de la quantité de capital (K) et de travail (L) disponibles, le niveau de production réalisée (Q) pouvant être affecté d'un facteur $\Phi(.)$ - sur lequel nous allons revenir - qui décrit les effets en retour de l'environnement sur ces fonctions,
- une relation d'équilibre (3) égalisant la production réalisée et la somme de la consommation (C), de l'investissement en bien 'normal' (I) et des investissements en abattement des émissions (Ab) et en adaptation au changement climatique (Ad),
- la dynamique du capital produisant le bien composite (4): celle-ci dépend du taux d'amortissement de ce capital (δ) et de la masse d'investissement qui l'accroît chaque année. Elle dépend aussi des effets en retour de l'environnement sur la durabilité des équipements, notés $\Psi(.)$.

² Et on s'en tiendra au *status-quo*, où les rapports de force actuels serviront à définir les politiques climatiques à long terme, ou on suivra une approche *adaptive*, où seront prises en compte les évolutions du revenu régional et les tendances démographiques.

³ Et on distinguera une *solidarité dynastique*, où chaque région est seulement concernée par le bien-être de ses seuls descendants, et une *solidarité universelle*, où les régions prennent en compte également le bien-être des descendants des autres régions.

Encadré I-1. Un modèle heuristique

Ce jeu d'équations permet de représenter comment par le biais des relations entre Economie/Environnement/Sociétés, les impacts induits par le changement climatique ($\Phi(\cdot)$, $\Psi(\cdot)$, $\Xi(\cdot)$) peuvent conduire à des dommages, c'est à dire à des pertes d'utilité. On retrouve classiquement à gauche les équations d'un modèle de croissance, où sont pris en compte les deux leviers des politiques climatiques : les investissements pour la réduction des émissions de GES (Ab) et pour les stratégies d'adaptation (Ad). A droite, quatre équations qui permettent de représenter la dynamique du climat selon la chaîne causale : émissions-concentrations-changement climatique, et les modifications de l'environnement, comme source d'aménités.

Maximisation intertemporelle du bien-être des populations

$$Max \sum_t \sum_i \alpha_i \cdot \frac{U(Ci_t, Ei_t)}{(1 + \rho_i)^t} \quad (1)$$

Fonction de production

$$Qi_t = F_i(Ki_t, Li_t, t) \cdot \Phi_i(\theta_i, \theta_{i-1}, Adi_t, Adi_{t-1}, t) \quad (2)$$

Equilibre Emplois/Ressources

$$Qi_t = Ci_t + Ii_t + f_i(Abi_t, Abi_{t-1}, t) + g_i(Adi_t, Adi_{t-1}, t) \quad (3)$$

Dynamique d'accumulation du capital

$$Ki_{t+1} = Ii_t + (1 - \delta_i + \Psi_i(\theta_i, \theta_{i-1}, Adi_t, Adi_{t-1}, t)) \cdot Ki_t \quad (4)$$

Emissions de Gaz à effet de serre

$$em_t = \sum_i G_i(Qi_t, Abi_t, t) \quad (5)$$

Cycle du carbone

$$M_{t+1} = H(M_t, em_1, em_2, \dots, em_t) \quad (6)$$

Changement climatique

$$\theta_{i,t+1} = L_i(\theta_i, M_1, M_2, \dots, M_t) \quad (7)$$

Qualité de l'environnement

$$Ei_{t+1} = \Xi_i(Ei_t, \theta_i, \theta_{i-1}, Adi_t) \quad (8)$$

Les indices i (resp. t) indiquent les régions (resp. la période)

Variables

Ab	investissement pour la réduction des émissions de GES
Ad	investissement pour les stratégies d'adaptation
C	consommation du bien composite
E	qualité de l'environnement
em	volumes des émissions de GES
I	niveau d'investissement
K	stock de capital
L	population
M	concentration atmosphérique de GES
Q	niveau de production
θ	indicateur du changement climatique

Paramètres

α	pondérations des utilités régionales dans la fonction de bien-être social
δ	taux de dépréciation du capital
ρ	préférence pure pour le présent

Fonctions

$F(\cdot)$	fonction de production
$f(\cdot)$	coût des mesures d'abattement
$g(\cdot)$	coût des mesures d'adaptation
$U(\cdot)$	utilité dérivée de la consommation et de la qualité de l'environnement
$\Phi(\cdot)$	impacts du changement climatique sur la production
$\Psi(\cdot)$	impacts du changement climatique sur le capital productif
$\Xi(\cdot)$	impacts du changement climatique sur la qualité de l'environnement

La colonne de droite résume les déterminants du changement climatique. Il importe de les repérer car il faudra revenir sur les incertitudes qui caractérisent chacun d'entre eux:

- les émissions nettes de gaz à effet de serre (em) dépendant du niveau d'activité et des efforts d'abattement (5),
- le passage émissions-concentrations (M) qui dépend du cycle du carbone (6),
- la sensibilité climatique, c'est-à-dire la façon dont des paramètres comme la température, la pluviométrie ou la variabilité du climat (résumés ici par l'index θ) répondent à un niveau donné de concentration (7),
- la qualité de l'environnement, qui dépend de la façon dont celui-ci, comme source d'aménités (paysages, régularité et douceur du climat, stabilité), va être affectée par le climat modifié (8).

Cette simple description permet dans un premier temps de regrouper les impacts climatiques en trois vecteurs primaires par où peuvent s'enclencher des mécanismes à l'origine d'une baisse du niveau de l'utilité « de référence » et engendrer, donc, des dommages. Nous en détaillerons quelques modalités parmi les plus étudiées, en essayant autant que possible de donner des exemples relatifs à la situation française ou à tout le moins, européenne.

I.1. Dégradation de la productivité du capital naturel et du facteur humain

La qualité de l'environnement sous-tend l'existence d'activités productives (l'agriculture, la sylviculture, la pêche et l'élevage entre autres), elle peut être à l'origine d'un flux de revenus (les activités touristiques par exemple) et sans médiation financière assurer un certain nombre de services (disponibilité de l'eau, faculté d'épuration de certains milieux, ressources de la mer dans les cultures traditionnelles). Rappelons, pour en donner un ordre de grandeur, que [Costanza et al., 1997] estiment ces services à 30 000 milliards $US\$$, soit presque le double du revenu mondial à cette période (18 000 milliards $US\$$)⁴. On sait que cette estimation est très décriée⁵, comme une évaluation à la baisse et ses auteurs d'ailleurs la considèrent comme une borne inférieure de la « vraie » valeur. Sous l'effet du changement climatique, la dégradation du capital naturel et des services qu'il offre pourrait se traduire par une baisse de la productivité de secteurs vulnérables et une altération des biens et services qu'ils produisent. La fonction $\Phi(.)$ du modèle englobe ces rétroactions du changement climatique sur les activités productives⁶ et nous allons passer en revue quelques exemples.

⁴ On retire ici du total de l'estimation (33 000 milliards $US\$$ pour la valeur centrale) les bénéfices prodigués par les écosystèmes et le capital naturel au titre des services culturels (3 000 milliards $US\$$ pour la valeur centrale), qui dans le modèle que nous venons de présenter relèvent des satisfactions dérivées de la qualité de l'environnement.

⁵ Ainsi, [Toman, 1998] la qualifie d'un "serious underestimate of infinity".

⁶ On peut remarquer que dans la maquette du modèle présentée à l'encadré 1, comme dans la majeure partie des modèles intégrés, l'impact du changement climatique sur les activités productives est représenté au moyen d'une fonction multiplicative de la fonction de production. La rétroaction de l'environnement sur l'économie est donc traitée d'une manière neutre au sens de Hicks, ce qui est comme nous le verrons dans la section suivante, une manière très grossière d'aborder ce problème. Cependant, cette maquette n'ayant qu'une vocation pédagogique, cette simplification demeure acceptable.

I.1.1. Changement climatique et vulnérabilité des productions agricoles

L'exemple de l'agriculture est certainement le plus riche d'enseignements sur ce point : une abondante littérature cherche à évaluer la variation du rendement de différentes cultures pour des scénarios climatiques et socio-économiques contrastés. Si une grande majorité des études globales n'envisage pas une rupture à l'échelle mondiale de l'équilibre offre/demande de biens agricoles, elles s'accordent sur une transformation importante de la géographie de la production et des risques aggravés pour la sécurité alimentaire des zones vulnérables ([*McCarthy et al.*, 2001], chp. V).

Reprenons par exemple ici les conclusions d'un rapport récent de l'IIASA [*Fischer et al.*, 2002]. Il s'agit de la première étude à faire appel à une approche intégrée systématique pour explorer les impacts du changement climatique sur le secteur agricole : volumes produits, localisation des productions, commerce international des denrées alimentaires et aspects de la sécurité alimentaire. Ces travaux ont été menés sur la base des scénarios SRES (les 4 marqueurs) qui ont fourni un cadrage macro-économique : évolutions démographiques, croissance économique, projections des émissions des gaz à effet de serre. Chacun des scénarios a été intégré par trois modèles climatiques différents pour rendre compte des incertitudes sur la réponse du climat. Ces sorties climatiques ont servi à définir avec d'autres paramètres environnementaux (en particulier, les caractéristiques des sols) et économiques (éventail de techniques disponibles) les productivités potentielles des cultures, elles-mêmes intégrées dans un modèle d'équilibre général mondial pour articuler systèmes agricoles nationaux et marchés internationaux.

Dans leurs conclusions, les auteurs attirent l'attention sur l'accroissement des disparités Nord-Sud tant sur le plan des potentiels de production agricole que de l'autosuffisance alimentaire. Par exemple, pour tous les scénarios climatiques (12 au total), on observe à l'échelle mondiale un accroissement des terres favorables à la mise en culture mais cet effet se concentre essentiellement dans l'hémisphère Nord (gains potentiels de 20 à 50% pour l'Amérique du Nord et de 40 à 70% en Russie) tandis que les terres arables reculent en Afrique (jusqu'à 9% pour des terres souvent à double ou triple récolte annuelle).

Cet écart se creuse davantage quand, au-delà des rendements potentiels, on s'intéresse aux volumes effectivement produits et aux conséquences économiques et sociales des changements climatiques sur le secteur agricole. A nouveau, en raison des adaptations des agents et des marchés, un faible écart à l'échelle globale par rapport aux simulations de référence (de l'ordre de 2%) pour les volumes de céréales produits, mais de grandes différences par régions (spécialement pour les PVD asiatiques). Ces variations se répercutent sur la part de l'agriculture dans le PIB de chaque pays : toutes les régions en développement - à l'exception notable de l'Amérique latine - enregistrent des impacts négatifs (l'Afrique surtout avec des pertes représentant 2 à 9% du PIB en 2080). Le tableau est plus contrasté pour les pays développés : gains de 3 à 13% pour l'Amérique du Nord, de 0 à 23% pour la Russie et perte de 6 à 18% pour l'Europe de l'ouest (données pour le scénario A2 en 2080).

Enfin, pour ce qui concerne l'autosuffisance alimentaire, il est manifeste que les zones de production se concentrent dans les pays développés tandis que les pays en développement deviennent de plus en plus dépendants des importations. En fait, cette tendance apparaît déjà dans les scénarios de référence mais elle est exacerbée dans les scénarios de changement climatique (importations des PVD croissant jusqu'à 25%).

I.1.2. Changement climatique et disponibilité des ressources en eau

Concernant les ressources en eau, il faut rappeler qu'un milliard sept cents millions de personnes, soit un tiers de la population mondiale, vivent aujourd'hui dans des régions où l'abondance de la ressource est menacée (plus de 20% du flux est exploité, seuil couramment utilisé comme indicateur du stress hydrique) et parmi eux, quelques 450 millions connaissent une pénurie d'eau très marquée (plus de 40% du flux annuel est exploité). En 2025, cet effectif pourrait atteindre 5 milliards d'individus, selon les scénarios démographiques et socio-économiques envisagés dont [Vörösmarty *et al.*, 2000] ont démontré qu'il s'agissait des principaux déterminants du stress hydrique pour cet horizon temporel, loin devant le changement climatique⁷. Néanmoins, le changement climatique pourrait aggraver la situation dans un certain nombre de régions, notamment l'Asie centrale, le sud de l'Afrique et le pourtour du Bassin Méditerranéen ([McCarthy *et al.*, 2001], TS).

Des conclusions similaires, pour ce qui concerne l'Europe, ressortent du rapport ACACIA [Parry, 2000] où l'accent est mis d'une part sur l'accroissement du risque de pénurie et de sécheresse au sud (croissance de la demande, évaporation accrue pendant la période estivale sous l'effet conjugué d'une diminution des précipitations avec une hausse de la variabilité inter-annuelle et surtout de l'augmentation des températures) et sur les risques d'une mauvaise gestion de la ressource, aggravée par les très grandes marges d'incertitude.

Evaluer les conséquences du changement climatique sur les disponibilités en eau est en effet un exercice extrêmement difficile. D'un côté, les modèles d'impact doivent prendre en compte le jeu relatif entre apports saisonniers (évaluation très incertaine des précipitations) et ruissellement, infiltration et évapotranspiration. L'importance de ces phénomènes est très largement dépendante du climat et des conditions locales, plus ou moins influencées par l'homme. De l'autre, les modélisateurs doivent intégrer des scénarios de demande en eau, éventuellement selon les usages (domestiques, industriels, agricoles, récréatifs). Il s'agit donc d'un exercice de prospective délicat dans lequel les nombreuses couches d'incertitude réduisent la qualité des estimations. Par exemple, les effets du changement climatique sur le niveau des nappes phréatiques dépendent d'une part de la variation des précipitations pendant la période de recharge et d'autre part de la durée de cette période de recharge, qui peut être raccourcie par une évapotranspiration accrue. Une différenciation selon l'étendue des nappes phréatiques doit de plus être opérée. Les aquifères les plus étendus devraient voir leur niveau moyen s'élever, l'extension compensant l'irrégularité géographique et saisonnière des apports. A l'inverse, l'irrégularité saisonnière et inter annuelle des approvisionnements devrait influencer le régime des nappes locale à faible réserve, comme celles des massifs anciens ou celles à vidange rapide (karst).

Par ailleurs, en modifiant le régime des cours d'eau (diminution des apports, variabilité inter-annuelle accrue), le changement climatique pourrait réduire la capacité de production d'électricité dans plusieurs régions. On se rappelle que la puissance de certaines centrales nucléaires en France a été réduite pendant l'été 2003 faute d'approvisionnement en eau pour leur refroidissement. De même, la sécheresse qu'ont connu pendant la seconde moitié de l'année 2001 le Nord-Est et le Sud-Est du Brésil et les problèmes d'alimentation en énergie

⁷ Remarquons cependant que cette étude utilise des scénarios de changement climatique relativement anciens (la famille IS92) tandis que certains scénarios SRES sont beaucoup plus *agressifs*. De même, l'horizon considéré est relativement proche, c'est à dire à une date où les effets du changement climatique ne sont pas encore des plus prononcés.

électrique (rationnement des populations) qui l'ont accompagnée en sont un exemple⁸. Plus proche de nous, une étude d'EDF a cherché à évaluer les conséquences d'une modification du régime des cours d'eau sur le fonctionnement des centrales hydroélectriques du massif alpin. Selon le volume et la nature des précipitations futures (pluie ou neige), le débit des rivières et sa chronique sera modifié. Il ressort des conclusions que c'est surtout le calendrier plus que le volume des apports d'eau aux lacs de barrage qui sera modifié (apports plus précoces dans l'année) et que ce n'est donc pas un sujet d'inquiétude majeure.

I.1.3. Changement climatique et tourisme de montagne

L'impact sur le tourisme : la littérature commence à être fournie, en particulier sur les zones de montagne où les activités touristiques représentent une part importante de l'économie et des emplois régionaux⁹. Pour les pays en développement, rappelons les éventuelles menaces sur les récifs coralliens, base d'une activité touristique essentielle pour de nombreux Etats de l'Océan Pacifique et de l'Océan Indien [Barnett et Adger, 2001; World Bank, 2002a]. Nous reviendrons plus en détail sur cet exemple au Chapitre V de cette thèse.

Une série d'observations longues effectuées sur l'arc alpin, comme le recul généralisé des glaciers, qui ont perdu depuis 1860 presque un tiers de leur masse et un à deux kilomètres de longueur pour les imposants [Moreau, 2000], le raccourcissement de la saison de sports d'hiver (entre 1970 et le début des années 1990, elle a diminué de 12 jours à Crans-Montana (Valais, Suisse) [Roby, 2000]), le recours chronique à la neige de culture pour assurer la couverture neigeuse, rend tout à fait légitime les inquiétudes des stations de sport d'hiver face aux conséquences du changement climatique, inquiétudes qui sont maintenant régulièrement relayées dans la presse¹⁰

Une étude menée sur les Pyrénées et les Alpes indique des modifications non négligeables de la durée de l'enneigement chaque hiver sous l'effet du réchauffement, dans le sens d'une diminution [Martín, 2000]. En moyenne, la limite de la neige remonte de 150m pour chaque degré supplémentaire. Plus précisément, à une altitude de 1 500m, pour un réchauffement de 1,8°C, la diminution du nombre de jours d'enneigement serait de 45% dans les Pyrénées (soit jusqu'à 50 j), de 40% dans les Alpes du Sud (soit près de 50 j), de 20-25% dans les Alpes du Nord (soit 30j). Au delà de 2000m, la diminution est moindre (-10%). Dès lors, quel que soit le massif, les stations de moyenne montagne seront les plus touchées. Des résultats similaires sont obtenus pour la Suisse où la sécurité de l'enneigement ne serait plus systématique et ce dès 2025 : en 30 ans (1995-2025), on assisterait ainsi à un triplement des stations (soit 92 stations sur 267) où l'enneigement ne serait plus assuré pour la saison.

Les projections sont donc préoccupantes en particulier pour les petites stations dont la fragilité économique est déjà patente. En effet, à l'occasion des aléas météorologiques (variation

⁸ Rappelons qu'au Brésil, l'hydroélectricité représente près de 90% de la production d'électricité et que cette source d'énergie compte pour 35% de la consommation énergétique totale (Source : [IEA/AIE, 2001], [Schaeffer et al., 2000]).

⁹ Ainsi, la consommation touristique en France métropolitaine liée au tourisme de montagne représentait en 2001 15,5% d'un total de 97,1 milliards d'euros, c'est à dire un peu plus de 1% du PIB français la même année [Secrétariat d'Etat au tourisme, 2001].

¹⁰ Cf par exemple « Les stations de sport d'hiver des Alpes redoutent le réchauffement climatique », *Le Monde*, 25 janvier 2001, et « L'or blanc des Alpes sous la menace du changement climatique », *Le Monde*, 20 décembre 2002.

interannuelle de l'enneigement), elles montrent déjà l'insuffisance de leur assise pour faire face à de tels à-coups conjoncturels. A un moment où beaucoup d'entre elles arrivent à une période de renouvellement des équipements, la question de la rentabilité des investissements face au risque climatique devient en outre plus aiguë dans un contexte où l'aide publique est certainement moins abondante qu'à l'époque de leur installation initiale.

Pour autant, le recours à la neige de culture - pratique courante pour assurer l'activité des domaines skiables contre la variabilité inter-annuelle des apports neigeux (accompagnement en début et fin de saison, complément pour assurer l'ouverture des pistes) - ne peut pas être une solution durable face aux tendances lourdes des conséquences prévisibles du changement climatique. L'exemple suisse de Crans-Montana donne un éclairage précis [Rohy, 2000] sur les différentes limites de cette solution : coût d'installation et d'entretien des infrastructures, consommation en eau et en énergie, conditions météorologiques particulières nécessaires à leur fonctionnement optimal. Pour un système de canon à neige haute pression, l'investissement s'élève à 2 millions de francs suisse pour le premier kilomètre et 1 million et demi pour les suivants. La mise en place d'une telle infrastructure permet de dégager un gain d'environ 10% du chiffre d'affaire annuel. Les contraintes de rentabilité imposent de limiter la couverture du domaine skiable à 8% de sa superficie. Il faut également prendre en compte les coûts environnementaux sur la dégradation du paysage mais surtout sur la consommation en eau ($1 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^2 \cdot \text{an}^{-1}$ soit $40\,000 \text{ m}^3 \cdot \text{km}^2$) et en énergie ($35 \text{ kWh} \cdot \text{m}^3$ d'eau). Il s'agit donc d'une activité prédatrice à une période où précisément l'eau est rare en montagne pour cause de gel et où la compétition pour trois usages (eau potable, hydroélectricité et neige de culture) soumet les milieux naturels à une forte pression. La neige de culture ne saurait donc être une solution de remplacement ; la mise en place de telles installations n'est justifiée que pour régulariser des variations climatiques c'est-à-dire comme solution de complément en climat non perturbé.

Des expériences menées en Suisse ont tenté d'explorer des alternatives moins intensives en capital et plus respectueuses de l'environnement pour assurer la couverture neigeuse, comme le damage précoce des pistes pour résister au vent (gain d'exploitation : 15 j), le maintien de la continuité du manteau neigeux (10j), l'entretien de l'albedo (7j), l'aménagement des pistes (par exemple en aménageant des zones ombrées (1mois) ou en préparant des pistes sur tapis d'herbe sans rocher, permettant de skier avec une épaisseur de neige de seulement 20 cm).

Une autre catégorie de stratégies d'adaptation s'intéresse à une réorientation de la demande correspondant aux nouvelles attentes de la clientèle: développer le tourisme de montagne estival, proposer des activités alternatives au ski alpin comme les sports de patinage, la randonnée, envisager l'aménagement de parcs à neige. Nos voisins européens (la Suisse et l'Autriche) ont déjà anticipé cette évolution de la demande en exploitant les atouts naturels du milieu alpin (spécialement en opposition à un littoral estival pollué et surfréquenté) : ainsi à Crans-Montana, le tourisme estival représente 43% des nuitées tandis que le ski alpin ne représente que 35% des nuitées l'hiver. Face au changement climatique, il existe donc des stratégies d'adaptation qui ont commencé à faire leur preuve mais dans ce domaine, les stations françaises marquent un léger retard en comparaison de leurs concurrents et il n'est pas certain que les stations de moyenne montagne, même si elles sont d'emblée tournées vers une clientèle plus attentive aux valeurs traditionnelles de la montagne, puissent disposer des ressources financières nécessaires pour accompagner leur développement dans ce sens.

I.1.4. Changement climatique et accroissement des risques pour la santé humaine

Pour le GIEC en effet, il apparaît clairement que le changement climatique se traduira par de nombreux effets sur l'état sanitaire des populations ([*McCarthy et al.*, 2001], chp. IX) alors que de manière générale « *au cours du XX^{ème} siècle, l'influence du climat sur la santé s'est atténuée sur presque toute la planète sauf au Japon et, partiellement, en Italie* » [*Deneux*, 2002]. Sont classiquement distingués les effets directs (pics de mortalité pendant les vagues de chaleur estivales en ville, par exemple, diminution de la mortalité et de la morbidité hivernales quand cette saison devient plus clémente - comme sous nos latitudes) et les effets indirects : liens entre changement climatique et qualité de l'air en ville, extension probable de l'aire géographique de certaines maladies à vecteurs, risques de développement de maladies infectieuses et parasitaires dans les pays en développement à la suite de catastrophes naturelles d'origine climatique.

A. Influences directes de la température

Sous le climat tempéré dont jouit la France métropolitaine, la mortalité annuelle est nettement désaisonnalisée. L'hiver se signale cependant par un léger pic, d'autant plus prononcé que la saison est rigoureuse. En extrapolant à partir des données recueillies lors d'hivers particulièrement doux, *ceteris paribus*, l'effet de serre induit par un doublement de la concentration atmosphérique de CO₂ pourrait conduire, au milieu du siècle prochain, à une diminution moyenne de 5 à 7% de la mortalité hivernale.

Au contraire, une hausse des températures estivales pourrait se traduire par une hausse de la mortalité pendant cette saison, imputable en majeure partie à la recrudescence des maladies cardiovasculaires, cérébrovasculaires et respiratoires. Les catégories les plus touchées seraient les personnes âgées et les personnes défavorisées. En suivant la même démarche que précédemment (analogues temporels), avec les mêmes hypothèses, on pourrait proposer une hausse moyenne de la mortalité estivale de 12 à 18% (toujours en France métropolitaine). Les zones les plus touchées seraient vraisemblablement les grandes agglomérations et la mortalité estivale pourrait s'accroître du Nord au Sud de la France et de l'Ouest vers l'Est (effet modérateur de l'océan).

Dans l'éventualité de vagues de chaleur plus fréquentes (comme semblent l'annoncer les modèles climatiques), ces estimations devraient être révisées à la hausse, l'organisme ayant des difficultés à s'adapter à d'aussi brusques variations météorologiques¹¹ (Source : [*Besancenot*, 2000]). On a pu le constater en France avec le très lourd bilan (15 000 morts) de la canicule de l'été 2003.

B. Changement climatique et qualité de l'air en ville

De nombreux polluants (oxydes d'azote, monoxyde de carbone, particules, entre autres), provenant essentiellement de la combustion d'énergies fossiles (transports, résidentiel),

¹¹ A ce propos, [*Besancenot et al.*, 2002] ont montré pour la France qu' « *une pointe de chaleur aux heures cardinales ne représente pas une menace aussi forte qu'une température qui se maintient à un niveau modérément élevé sur une fraction importante du nyctémère. [...] Les personnes âgées ne supportent convenablement la chaleur de la journée que si la nuit leur permet de « récupérer » dans de bonnes conditions.* »

dégradent de façon importante la qualité de l'air ambiant en milieu urbain. Par le jeu de réactions chimiques dans l'atmosphère, favorisées par la température et l'ensoleillement, certains d'entre eux peuvent conduire à la formation d'ozone troposphérique, molécule particulièrement dangereuse pour la santé humaine (en particulier, recrudescence des crises d'asthme ou des bronchiolites). A la faveur du changement climatique, de tels épisodes de pics de pollution urbaine pourraient être plus fréquents.

L'adoption de technologies moins polluantes se traduirait par une amélioration de la qualité de l'air ambiant aux conséquences bénéfiques pour la santé humaine. C'est par exemple à ce titre que l'on peut parler des co-bénéfices¹² des politiques de réduction des émissions de gaz à effet de serre. Une étude récente [Davis et al., 2000] rappelle que l'impact attendu des politiques de réduction des émissions sur la santé humaine compte pour 70 à 90% de la valeur totale des co-bénéfices de telles politiques.

C. Le cas des maladies à vecteur

Les conditions climatiques sont un déterminant-clé de l'extension géographique des vecteurs de maladies, de leur activité saisonnière et du cycle de développement du parasite-hôte. Il est donc légitime d'évaluer les impacts possibles du changement climatique sur les maladies à vecteurs déjà existantes ou sur l'éventualité de l'introduction de nouvelles pathologies. Pour le professeur Rodhain [McCarthy et al., 2001], il semble que les changements épidémiologiques doivent rester modérés en France métropolitaine, ce qui n'est pas le cas des DOM-TOM tropicaux. Signalons le risque de réapparition du paludisme (à la condition que le parasite, *Plasmodium falciparum*, soit compatible avec les populations de vecteurs, l'anophèle, implantées en France), de réimplantation d'*Aedes aegypti*, principal vecteur de la fièvre jaune et de la dengue, et d'introduction d'*Aedes albopictus*, autre vecteur de la dengue.

Cependant, peut-être de manière plus aiguë que pour d'autres catégories d'impacts, de multiples sources d'incertitude demeurent à commencer par l'influence de nombreux facteurs sur la morbidité et la mortalité des populations, comme le niveau de revenu, l'état physiologique, les facultés d'adaptation de l'organisme. Ainsi, de manière générale, les effets liés à l'augmentation de la charge thermique seront davantage ressentis par les personnes déjà sensibles : les personnes âgées, les malades chroniques, les jeunes enfants ou les nourrissons. Les projections démographiques convergeant pour annoncer un vieillissement de la population française, on est donc en droit de s'attendre à un renforcement de sa vulnérabilité face au changement climatique. Néanmoins, un certain nombre de facteurs viennent modérer une telle estimation : le niveau de revenu, qui influence l'état physiologique, est un bon indicateur du niveau de confort (chauffage/climatisation), la capacité d'adaptation du corps à un environnement changeant, les différences selon le sexe des sujets, les progrès de la médecine et la disponibilité des soins.

¹² Les co-bénéfices, ou bénéfices ancillaires, des politiques de réduction d'émission de GES sont définis comme les améliorations du bien-être collectif résultant de telles actions mais non directement liées à leur objectif premier (infléchir le changement climatique). L'importance des bénéfices ancillaires estimés peut conduire à augmenter l'acceptabilité des politiques climatiques ou respectivement à diminuer les évaluations de leurs coûts. Etant donné qu'il s'agit essentiellement de bénéfices locaux - dont les conséquences sont ressenties par les agents qui entreprennent l'action -, il s'agit d'un enjeu important dès que l'on veut examiner la répartition des coûts et bénéfices régionaux des politiques climatiques.

I.2. Accélération de l'obsolescence du capital productif et des infrastructures

Une plus grande vulnérabilité du capital productif, des infrastructures et des implantations humaines en réponse au changement climatique pourrait dessiner une nouvelle carte de l'exposition aux risques naturels d'origine météorologique (tempêtes, inondations, glissements de terrain, entre autres) et obliger soit à construire des équipements plus robustes donc plus coûteux, soit à les renouveler plus fréquemment, soit enfin à les abandonner avant leur obsolescence 'normale'. La fonction $\Psi(.)$ du modèle heuristique cherche à représenter ces mécanismes. Ceci peut se faire par plusieurs biais :

I.2.1. Une vulnérabilité accrue due à une plus grande fréquence des événements météorologiques extrêmes

L'analyse des observations météorologiques recueillies sur la seconde moitié du XX^{ème} laissent entendre que la fréquence ou l'intensité, voire les deux, des événements extrêmes s'est modifiée sur cette période et les résultats des projections des modèles climatiques permettent de croire que cette évolution est susceptible de se poursuivre au XXI^{ème} siècle ([*Houghton et al.*, 2001], SPM). Il s'agit là autant d'événements associés directement aux distributions statistiques des paramètres du climat (extremum quotidien, nombre de jours de gel par an, nombre d'épisodes orageux) que de phénomènes météorologiques plus complexes (sécheresse, cyclones ou tempêtes de moyennes latitudes, épisode El Niño) [*Easterling et al.*, 2000].

On ne pourra peut-être jamais interpréter certains des désordres météorologiques récents (inondations au Sud de la France en septembre 2002, inondations du bassin de l'Elbe et du Danube en été 2002, les quatre typhons qui ont dévasté les côtes ouest du Pacifique cette même année) comme des preuves du changement climatique. Leurs impacts sont néanmoins symptomatiques de ce qui pourrait se produire si cette perspective se confirmait et légitiment les inquiétudes des compagnies d'assurance (Encadré I-2). Ainsi l'assureur Munich Re estime à 9,2 milliards d'euros le coût des inondations en Allemagne pendant l'été 2002 [*Münich Re*, 2003]: dommages aux habitations (quatre millions de personnes concernés), monuments historiques (dans la région de Dresde notamment), ponts, routes et lignes de chemin de fer endommagés ou emportés (500 km de rails à reconstruire selon la Bundesbahn).

Retenons pour la France les tempêtes successives de 1990, responsables de 10 milliards de francs de dégâts, et les deux tempêtes spécialement violentes de l'hiver 1999 dont les dommages ont atteint le montant sans précédent dans l'histoire de l'assurance française de 44,3 milliards de francs (soit plus de 12 fois les cotisations tempêtes de l'année). Des inondations également, à Vaison-la-Romaine en 1992 (38 morts et des dommages évalués à 2,4 milliards de francs), dans le Sud et le Sud-ouest de la France fin 1999 (31 morts et des pertes chiffrées à quelques 4,2 milliards de francs), pour ne citer que les événements au bilan le plus lourd (Source : [*FFSA*, 2000], [*Münich Re*, 1999], [*Münich Re*, 2000]). On peut constater que ne figurent principalement dans cette liste que des événements comme les tempêtes (hivernales) et les inondations (soit causées par des crues particulièrement importantes ou des précipitations soudaines et très intenses, comme les événements cévennols). Pour la France métropolitaine, ce sont les principales catastrophes naturelles climatiques à redouter (à l'exception de phénomènes très localisés comme la grêle et la foudre). Pour les DOM-TOM, la situation est plus contrastée avec une très grande exposition aux cyclones tropicaux en Polynésie Française,

en Nouvelle-Calédonie, aux Antilles Françaises et à la Réunion, et aux inondations aux Antilles et à la Réunion¹³.

Encadré I-2. Changement climatique et secteur de l'assurance

Ces vingt dernières années, les coûts des catastrophes naturelles supportés par les compagnies d'assurance ont connu une forte augmentation: sur les trente catastrophes naturelles dont le coût pour l'industrie de l'assurance a dépassé un milliard de dollar (valeur non corrigée de l'inflation), 28 sont d'origine climatique¹⁴ et 27 ont eu lieu depuis 1990 [Berz, 2001]. Cette accélération est encore plus nette avec les statistiques suivantes : entre la décennie 1960/69 et 1980/89, le nombre de catastrophes naturelles majeures a augmenté d'un facteur 2,3 (de 20 à 63), les dégâts infligés d'un facteur 2,8 et le montant des pertes assurées d'un facteur 3,6 ; dix ans plus tard, en gardant la période 1960/69 comme référence, ces mêmes ratios prennent respectivement les valeurs 3,2, 8,6 et 16,1. Ces chiffres indiquent en particulier que les coûts supportés par le secteur de l'assurance ont crû plus vite que le montant des dommages en l'espace de 10 ans. Cette évolution s'est donc accompagnée d'une croissance rapide de l'exposition des compagnies, révélant par là leur vulnérabilité potentielle au changement climatique: entre 1985 et 1999 le quotient 'Montant des pertes assurées imputables à des catastrophes naturelles/Montant des primes' a été multiplié par 2,9 ([McCarthy et al., 2001], chp. VIII).

Plusieurs facteurs permettent d'expliquer cette évolution. En premier lieu, la croissance de la population mondiale, sa concentration dans les villes et son établissement dans des zones exposées aux risques climatiques (comme les zones côtières). Ensuite, l'accumulation d'actifs de valeur croissante dont une part de plus en plus importante est couverte par des polices d'assurance. Troisièmement, la plus grande vulnérabilité des biens, des technologies et des réseaux aux aléas climatiques. Enfin, une tendance à la hausse du nombre de catastrophes naturelles d'origine climatique. Cette tendance va-t-elle s'infléchir au XXI^e siècle ? Malgré l'absence de conclusions définitives du troisième rapport du GIEC, Munich Re se veut très pessimiste. Risque climatique accru, vulnérabilité aux aléas climatiques en hausse, croissance exponentielle de la part assurés des actifs exposés, une partie des coûts additionnels induits par le changement climatique devra être supportée par les compagnies d'assurance et de réassurance, qui placent désormais cet enjeu au premier rang de leurs préoccupations.

Une étude de la Fédération française des sociétés d'assurances (FFSA)¹⁵ a cherché à évaluer le coût incrémental annuel du changement climatique pour le secteur de l'assurance en France jusqu'en 2050. Concernant les tempêtes, les estimations varient de 10 à 50 milliards de francs pour les seuls dommages aux biens. S'agissant des inondations, une fourchette de 35 à 47 milliards de francs est avancée. Le renforcement de la tendance actuellement observée fait craindre une banqueroute généralisée des entreprises du secteur ou à tout le moins une érosion progressive de leurs réserves. Rappelons que le cyclone Andrew, le plus important qu'ait connu la côte Est des Etats-Unis, a causé en 1992 des dégâts chiffrés à 30 milliards de dollar, dont 17 milliards étaient assurés. Cinq grandes compagnies d'assurance se sont retrouvées en faillite.

En réponse à une redéfinition des risques climatiques, le secteur dispose de quatre moyens pour s'adapter :

- *augmenter le montant des primes pour sécuriser les réserves.* Néanmoins l'environnement très concurrentiel dans lequel se trouvent ces entreprises les contraint à limiter cette hausse. Les réassureurs ont déjà augmenté leurs tarifs de 30 à 50%, hausse qu'ils jugent encore très insuffisante.
- *ajuster les contrats d'assurance :* retrait de certains marchés et non-renouvellement des polices pour les zones trop exposées, augmentation des franchises, plafonnement des pertes maximales exigibles. Une telle attitude appellerait cependant à redéfinir la répartition des risques entre Etat et secteur privé à un moment où nombre de gouvernements commencent à afficher des volontés de désengagement de leur charge d'assurance. Ce problème se poserait de manière particulièrement aiguë pour les pays en développement où l'assurance, quasiment inexistante, ne serait pas appelée à se développer, laissant aux Etats, quand ils le peuvent, ou à la communauté internationale la charge de prévenir, assister et indemniser les populations en cas de catastrophes. Certaines voix plaident d'ailleurs en faveur de la création d'un fonds d'assistance aux victimes de catastrophes climatiques, placé sous l'égide de la

¹³ Au bilan d'août 1999, la France (métropole et DOM) compte 17 831 communes exposées à un ou plusieurs risques naturels (en excluant les communes à risques sans enjeu humain). Il s'agit très majoritairement du risque inondation. Source : [IFEN, 2000].

¹⁴ Les deux autres catastrophes sont deux tremblements de terre : Los Angeles (CA, 1994) et Kobe (Japon, 1995).

¹⁵ Non publiée, éléments extraits de quotidien *Le Monde*: « La multiplication des désordres climatiques coûtera très cher aux assureurs », P. Santi, 12 décembre 2000.

Convention Climat, et développé à l'image des initiatives en ce sens des Nations Unies et de la Croix Rouge Internationale [Müller, 2002].

- *renforcer la prévention et la gestion des crises.* A titre d'exemple, c'est ce que préconise le réassureur Swiss Re pour le cas des inondations [Hausmann, 1999], en en faisant une priorité. D'une part, l'Etat doit identifier les zones à risque, y dissuader l'installation et protéger les investissements existants. D'autre part, les propriétaires se doivent de protéger leur patrimoine, notamment en réduisant leur exposition. Ceci peut se faire au moyen d'incitations financières (hausse des franchises qui pousse à entreprendre des travaux) ou contractuelles (clauses du contrat imposant une mise en conformité) ou réglementaires (définition de nouvelles normes de construction). C'est d'ailleurs une option sur laquelle Pierre Picard insiste partant du constat récurrent à chaque catastrophe naturelle de l'insuffisance des mesures de prévention : « Devant la perspective d'un accroissement des phénomènes climatiques extrêmes, la recherche d'une meilleure articulation entre prévention et solidarité dans les systèmes d'assurance devrait être une priorité dans les pays du Nord, particulièrement en France ».
- *transférer les risques climatiques vers les marchés financiers.* Deux instruments de couverture originaux ont été développés : les cat(astrophic) bonds, obligations émises par les compagnies d'assurance pour titriser un risque climatique, et des contrats d'assurance spécialisés, les dérivés climatiques (weather derivatives) - qui peuvent éventuellement être échangés sur un marché. Ces instruments sont déjà largement utilisés aux Etats-Unis pour couvrir agriculteurs, producteurs d'électricité, parcs de loisirs ou stations de sport d'hiver en cas d'aléas climatiques et commencent à apparaître en Europe.

L'action des entreprises de l'assurance s'étend également à un autre champ: une implication croissante dans la négociation climat. En 1997 était présenté pendant les sessions de COP 3 à Kyoto le texte de l'Insurance Industry Initiative (UNEP-III), un accord volontaire entre professionnels de l'assurance ayant pour but d'intégrer des objectifs de soutenabilité et de promouvoir le principe de précaution dans les pratiques de l'assurance. Défini comme la pierre angulaire de l'engagement des industriels du secteur dans le processus de négociation, il lui était assigné un rôle de plate-forme entre scientifiques, cercles politiques, ONG de défense de l'environnement ou de développement pour faire bénéficier les différentes parties en présence de l'expertise sur le risque naturel et agir en faveur de l'entrée en vigueur du Protocole de Kyoto. Bien que cette tentative de coordination ait remporté un succès mitigé auprès des professionnels du secteur¹⁶, différentes voix se font entendre pour recommander l'adoption du schéma « Contraction-Convergence », une re-direction des investissements des compagnies vers des secteurs peu émetteurs de carbone, une réflexion sur le partage du risque collectif entre particuliers, compagnies d'assurance et gouvernements¹⁷.

I.2.2. Hausse du niveau des mers et vulnérabilité des territoires insulaires et des régions côtières

Une des conséquences prévisible du changement climatique est une hausse du niveau des mers imputable à l'expansion thermique des océans, au recul des glaciers continentaux plus sensibles que les calottes polaires¹⁸ et une modification des équilibres glace de mer/eau libre. Les estimations du GIEC pour une hausse moyenne des océans sont les suivantes : 3 à 10 cm en 2020, 4 à 32 cm en 2050 et 9 à 63 cm en 2080¹⁹. Les conséquences d'une hausse du niveau des mers sont multiples et concernent autant les écosystèmes que les implantations humaines et les

¹⁶ Essentiellement, seules les entreprises japonaises et nord-européennes se sont impliquées.

¹⁷ cf. "Comprehensive Cover (interview with Andrew Dlugolecki)", *Environmental Finance* (dec 00 - jan 01), p. 40.

¹⁸ Les glaciers continentaux sont plus sensibles que les calottes polaires à une élévation de la température qui peut se traduire par le franchissement d'un seuil de stabilité. Pour les glaciers alpins par exemple, la glace tempérée, au point de fusion en dessous de 3500m, est donc particulièrement sensible aux variations de température et de rayonnement. A cela s'ajoute des modifications possibles à la baisse des apports sous forme de neige pendant la période hivernale.

¹⁹ Année de référence : 1990. Ces estimations ne prennent pas en compte les particularités topographiques de chaque zone littorale. Par exemple, les variations relatives du niveau des mers imputables aux mouvements tectoniques. Ainsi, le bouclier Scandinave, libéré des glaciers de la dernière glaciation, se relève tandis que le reste de l'Europe s'abaisse lentement (- 5cm vers 2080 pour la France).

activités économiques, qui se sont densifiées sur le littoral au cours des dernières décennies. Dans cette section, nous nous intéresserons aux deux dernières, en insistant plus spécialement sur le cas de la France.

Rappelons pour commencer que les communes littorales de la France métropolitaine représentent 4% de la superficie du territoire national et accueillent 10% de la population française et qu'elles reçoivent quelques trente millions de visiteurs par an. Par ailleurs, les zones littorales sont souvent des écosystèmes de grande diversité biologique et de grande importance écologique, dont beaucoup sont menacés par une pression anthropique accrue (tourisme, aquaculture et agriculture, industries, activités portuaires, pression foncière pour la construction de logements, d'infrastructures). Les implantations humaines et le développement des activités ont par ailleurs modifié l'équilibre terre/mer : la construction d'ouvrages de défense du littoral, de barrages fluviaux a fait diminuer les apports de sédiments continentaux, ce qui menace directement la stabilité des zones côtières. Le delta du Rhône peut être cité en exemple. Les milieux côtiers sont donc la résultante d'un équilibre fragile entre influence continentale et maritime, empreinte de l'homme et résilience de la nature.

En réponse à une élévation du niveau de la mer, on pourrait assister à²⁰ :

- *la submersion des zones basses (espaces deltaïques, littoraux à lagune, marais maritimes)*. Le marnage est un bon indicateur de la vulnérabilité: plus il est faible, plus on peut s'attendre à des conséquences importantes pour une hausse donnée du niveau de la mer. Ainsi, les côtes méditerranéennes où le marnage est généralement inférieur à un mètre seront beaucoup plus exposées que le littoral atlantique.
- *une accélération de l'érosion des côtes*. Prévoir le déplacement du trait de côte en réponse à une élévation du niveau de la mer implique d'envisager simultanément plusieurs facteurs comme la morphologie du littoral, sa nature (côte rocheuse, falaise crayeuse, bande sablonneuse), les apports de sédiments côtiers, l'existence d'ouvrages de défense. Une estimation annonce un recul de 50 à 100m du trait de côte pour l'Europe du Nord vers 2080 [Parry, 2000].
- *un renforcement de la salinisation des sols et des nappes phréatiques côtières*. Beaucoup de scénarios s'accordent pour prévoir simultanément une baisse des apports d'eau douce (exploitation plus intense des ressources en eau, baisse de la quantité d'eau reçue par bassin versant - surtout pour l'Europe du sud) et une montée du niveau de la mer. Les aquifères présents sous les dunes ou à l'embouchure des estuaires sont des nappes phréatiques vulnérables en puissance. En Polynésie, la réduction des lentilles d'eau douce pourrait poser de graves problèmes d'approvisionnement pour les populations de ces atolls. Cette situation apparaît déjà dans d'autres atolls du Pacifique, comme les îles Kiribati²¹.
- *et un accroissement du risque de surcôte*. Une hausse du niveau de la mer combinée à une érosion accrue du littoral (qui risque de déstabiliser les ouvrages de défense) laisse croire à une augmentation du risque de surcôte et d'inondations des zones côtières à l'occasion de tempêtes particulièrement violentes. Dans le cas de la France métropolitaine, quelques données permettent de mesurer l'augmentation du risque de surcôtes sous l'effet conjugué de la hausse du niveau des mers, de

²⁰ Pour une revue de littérature, voir par exemple : [McCarthy et al., 2001] (chp. VI).

²¹ cf. « La mer menace l'atoll de Tarawa », *Le Figaro*, édition du 17 juillet 2001, M. Memmessier.

phénomènes météorologiques (tempêtes et marées) et de la morphologie du littoral : pour une élévation de 30cm du niveau des mers, une surcôte de 1,4m dans l'estuaire de la Loire serait à redouter tous les 10 ans, au lieu de tous les 100 ans comme c'est le cas actuellement [*Deneux*, 2002]. Pour la région de New York, une étude du Columbia Earth Institute entreprise dans le cadre du programme NACC [*Rosenzweig et Solecki*, 2001], indique que sous l'effet d'une élévation du niveau de la mer, le temps de retour d'une surcôte aujourd'hui centennale à Manhattan décroît en moyenne de 80 à 43 ans en 2020 jusqu'à atteindre 60 à 4 ans en 2080. L'intervalle d'incertitude s'explique en particulier par les incertitudes sur les projections de hausse du niveau de l'océan : dans le cas qui nous intéresse, elle pourrait atteindre 24 cm à 108 cm en 2080. Concrètement, ce risque est particulièrement prégnant pour les infrastructures routières de l'agglomération de New York : à la fin du siècle, à peu près deux tiers du réseau dont l'altitude est inférieure à 3m pourraient être submergés au moins une fois tous les dix ans.

A l'échelle mondiale, 20% de la population du globe vivent à moins de 30 km des côtes ([*McCarthy et al.*, 2001], chp. VI). Pour une hausse du niveau des mers d'environ 40cm vers 2080 et même en présence d'importantes mesures de protection des côtes, [*Nicholls et al.*, 1999] évaluent à 93 millions le nombre d'individus touchés annuellement par une inondation (contre 13 millions sans hausse du niveau des mers). Une nouvelle fois, cette statistique agrégée ne rend pas compte de résultats très contrastés à l'échelle régionale : le plus lourd tribut, sous ce scénario, serait supporté par les zones côtières du littoral de l'Océan Indien (du Pakistan à la Birmanie) (55%), puis les régions littorales de l'Insulinde, de l'Indonésie et des Philippines (23%), et enfin de l'Afrique et de l'est du Bassin méditerranéen (15%).

I.2.3. Dégel permanent ou saisonnier du permafrost dans les zones montagneuses et boréales

En Russie, un grand nombre d'immeubles de cinq étages construits entre 1950 et 1990 sur des sols de type permafrost permanent sont déjà endommagés, probablement en raison du réchauffement observé dans cette région [*Weller et Lange*, 1999]. Selon cette même étude, en l'absence de mesures particulières, la plupart des constructions actuelles des villes du bassin de la Léna, comme Iakoustk et Tiksi, seraient inutilisables vers 2030. L'instabilité du sol dans ces régions aura des conséquences importantes pour les routes, les pistes d'atterrissage, les pipelines et pour toute l'industrie minière.

Des exemples plus précis peuvent être fournis pour l'Alaska, qui a connu en l'espace de 40 ans (depuis 1960) un réchauffement très prononcé : en moyenne quelques +3°C (beaucoup plus marqué en hiver : +4,5°C). L'ensemble du rapport pour le programme NACC sur les conséquences du changement climatique pour l'Alaska est placé sous le signe du recul de la cryosphère (fonte des glaciers, dégel du permafrost, recul de la couverture neigeuse, amincissement et recul de la banquise) dont la région a pu expérimenter les effets ces dernières années : par exemple, des dommages aux routes (coût de réparation estimé : 3 million US\$ par mile (1,6 km)), une instabilité des sols qui s'est traduite par des glissements de terrain, causant coupure des routes et des ponts et des inondations localisées. Ces dégâts donnent un avant-goût des impacts potentiels du réchauffement pour les infrastructures et les implantations humaines dans cette région. En fait, même si beaucoup des effets du réchauffement peuvent sembler bénéfiques à long-terme (pour les infrastructures, les pêcheries et l'agriculture), la transition vers de nouvelles conditions climatiques jugées aujourd'hui plus favorables sera indéniablement

coûteuse. Toutes les activités humaines s'exercent en effet pour le moment dans un environnement dominé par la neige et par la glace ; pour autant, la plupart de cet environnement est proche du point de fusion²² et l'amplitude du réchauffement pourrait suffire à faire franchir ce seuil et à remodeler considérablement les paysages et les conditions physiques du milieu.

Pour les zones montagneuses, une menace potentielle est celle de l'augmentation des risques de glissement de terrains dans des zones aujourd'hui 'sûres' [Beniston, 2000] ; ce problème se posera par exemple pour les entreprises de remontées mécaniques dont les pylônes sont souvent ancrés dans ce genre de sol.

I.3. Altération des aménités fournies par l'environnement

A côté de ces deux ensembles de facteurs qui affectent l'appareil productif (que nous avons représentés par les fonctions $\Phi(\cdot)$ et $\Psi(\cdot)$) et dont la variation est déclenchée par celle des paramètres climatiques, θ , l'analyse des dommages ne peut ignorer l'environnement comme porteur d'aménités²³. L'essentiel dans cette taxonomie est que cette catégorie d'impacts sur le bien-être est, pour l'analyse économique, toute aussi légitime que celle des impacts sur l'appareil productif. Il peut s'avérer par exemple que la préférence pour la stabilité de notre climat soit, comme les tableaux de maître, un 'bien supérieur' et que les populations riches désirent affecter une part croissante de leur revenu à sa préservation. Certes, cette préférence pour la stabilité du bien environnement peut dépendre de motivations variées et très différentes selon les individus mais il importe de distinguer au moins deux grandes catégories logiques :

I.3.1. L'ensemble des 'satisfactions' présentes et futures que peut prodiguer l'environnement

Nous ne souhaitons pas pour le moment aborder l'épineuse question de l'évaluation des biens et services environnementaux et des bénéfices des politiques de préservation de l'environnement, question sur laquelle nous reviendrons à la section suivante, mais nous souhaitons seulement rappeler les composantes courantes des préférences vis à vis de l'environnement et comment elles pourraient être affectées par le changement climatique :

- des préoccupations hédonistes que l'on peut rattacher à la valeur d'usage comme la satisfaction que procure la pratique de loisirs dans des paysages préservés ou le fait d'habiter dans une zone à haute qualité de vie (que reflètent les valeurs foncières qui prennent par exemple en compte la qualité du climat²⁴),

²² Ainsi, la température moyenne annuelle à Fairbanks est : -2°C.

²³ On se rappelle que dans l'évaluation de [Costanza et al., 1997], les bénéfices culturels représentent près de 10% de l'ensemble des biens et services prodigués par les écosystèmes et le capital naturel.

²⁴ cf. par exemple l'application de la méthode des prix hédonistes aux marchés immobilier et foncier en Grande-Bretagne et en Italie pour déterminer les valeurs d'aménité attribuées au climat [Maddison, 2001]. Pour l'Italie, les auteurs concluent que la population préférerait un climat plus sec et plus ensoleillé, plus chaud en hiver et plus frais en été. Ce n'est pas vraiment une surprise. Ces résultats ne sont cependant qu'un début car ils ne donnent qu'une première évaluation des préférences vis à vis du régime climatique (en particulier pour identifier le régime

- des motivations d'ordre plus personnel comme les valeurs de legs et les valeurs patrimoniales des paysages auxquels nous sommes attachés, depuis les glaciers pour les habitants des vallées de montagne jusqu'à la préservation de Venise ou du Mont Saint-Michel, et les valeurs d'existence que nous accordons à certains écosystèmes (les mangroves comme les récifs coralliens, menacés par la montée des eaux et le réchauffement) ou à certaines espèces menacées²⁵.

Très peu d'études se sont risquées à tenter d'évaluer les consentements à payer pour préserver les aménités offertes par l'environnement que menacerait le changement climatique bien qu'elles soient reconnues comme une composante non négligeable des bénéfices des politiques climatiques²⁶. Ceci peut s'expliquer à la fois, parce que nous possédons encore bien peu d'informations sur les impacts (évolution de la biodiversité, dynamique des écosystèmes - en particulier pour isoler la part d'effets imputables au changement climatique des effets imputables à d'autres pressions anthropiques) et parce que, même si les méthodes d'évaluation des bénéfices environnementaux des politiques publiques existent, les conditions de leur application au changement climatique ne laissent pas de nourrir des doutes sur leur validité et la qualité des estimations. Comme le résume très bien Richard Tol ([Tol, 1999a], p. 9): "*Climate economists face therefore a double problem, i.e., how to derive a value of something which is unknown in quantity and price*". A notre connaissance, seuls Richard Tol ([Tol, 1999a], [Tol, 1999b]) et William Nordhaus ([Nordhaus et Boyer, 1999]), ont proposé - en les encadrant de nombreuses réserves - des estimations avec une couverture globale. Dans les deux cas, ces dommages (toujours négatifs) représentent une part non négligeable des totaux régionaux pour les pays développés mais une part beaucoup plus faible dans les régions vulnérables. Ce contraste s'explique entre autres par l'hypothèse, formulée dans les deux cas, d'une élasticité-revenu du consentement à payer pour préserver l'environnement strictement supérieure à 1: autrement dit, l'environnement comme source d'aménités est ici traité comme un bien supérieur.

I.3.2. L'ensemble des facteurs qui contribuent à une aversion spécifique au risque d'une rupture de l'environnement, conséquence d'une évolution (défavorable) du climat

Les dommages causés à l'environnement dans son ensemble peuvent devenir un sujet d'inquiétude majeure. Ce point est par exemple sensible lorsque l'on s'intéresse au sondage conduit par William Nordhaus [Nordhaus, 1994a] sur les dommages du changement climatique auprès de 19 scientifiques d'horizon disciplinaire varié (sciences naturelles, économie, technologie, sciences sociales). Il ressort de l'analyse des résultats ([Nordhaus, 1994a], [Roughgarden et Schneider, 1999]) que les estimations avancées par les chercheurs en sciences naturelles sont de loin les plus pessimistes : les pertes y sont presque dix fois

optimal) et pas une évaluation des consentements à payer/à recevoir quand le climat est modifié (et quand la direction de cette évolution est incertaine).

²⁵ Par exemple, [McCarthy et al., 2001] (chp. V, p. 250) indique : "*There is little evidence to suggest that processes associated with climate change will slow species loss*" ou plus récemment, les résultats alarmistes de [Thomas et al., 2004], annonçant un risque d'extinction massive ou de mise en péril d'espèces et ce dès 2050, même pour des scénarios de changement climatique relativement modérés.

²⁶ "*One of the most important and difficult issues to evaluate is the potential for climate change to have damaging effects on human settlements and ecosystems. This set of issues reflects a wide variety of factors that are difficult to model and quantify but may be of major concern*" ([Nordhaus, 1998], §III-6).

supérieures aux chiffres donnés par les économistes (hors économie de l'environnement) et deux à trois fois supérieures aux chiffres donnés par les économistes de l'environnement. En même temps, quelle que soit l'appartenance disciplinaire des scientifiques interrogés, plus une estimation pessimiste est donnée, plus la part des dommages dits 'non-marchands' - c'est à dire qui ne sont pas pris en considération dans les catégories classiques de la comptabilité nationale - est importante.

Ces résultats illustrent la diversité des croyances portant sur les dommages et parmi eux, les conséquences d'une rupture des milieux dans lesquels sont inscrits les activités économiques et les implantations humaines. Les positions pessimistes finalement mettent en avant la dépendance de nos sociétés vis à vis des services prodigués par les écosystèmes, services qui peuvent être mis en péril de manière irréversible par les changements climatique et pour lequel il n'existe pas de substitut technique produit par l'homme.

Dès lors, la préférence pour la stabilité du climat actuel peut venir non pas du fait que nous le préférons à d'autres (que nous ne connaissons pas) mais du refus d'un pari dont l'issue nous semble incroyablement risquée en raison des incertitudes qui pèsent sur l'évolution d'un support essentiel de la vie sur terre, des activités productives, de la qualité de vie. Sans aller jusqu'à l'hypothèse de « catastrophisme éclairé » chère à Jean-Pierre Dupuy, on peut vouloir protéger la stabilité du climat en vertu de l'observation d'un principe de précaution vis à vis d'impacts aujourd'hui imprédictibles, sur lesquels nous reviendrons ci-après.

Les exemples que nous venons de présenter pour illustrer les trois mécanismes qui peuvent engendrer des dommages montrent combien notre connaissance dans ce domaine est encore très incertaine et très parcellaire. Si les impacts sur le secteur agricole et les régions côtières sont relativement bien étudiés, de grandes inconnues subsistent par exemple sur la vulnérabilité des écosystèmes ou des populations face aux risques sanitaires. De même, la couverture des études d'impacts est loin d'être mondiale et hors les régions développées, peu d'études sont disponibles.

Surtout, le point important est que dans la plupart des cas, le changement climatique intervient comme facteur aggravant de problèmes pré-existants (épuisement des sols, limites des ressources en eau, politiques agricoles inappropriées, menaces sur la biodiversité, irrégularités du couvert neigeux compte-tenu de la variabilité inter-annuelle du climat). Ce dernier point souligne les liens étroits entre vulnérabilité au climat et au changement climatique et perspectives socio-économiques : comment ces dernières peuvent la réduire (la mise en place de programmes de santé publique dans les PVD permet d'éradiquer la malaria) ou au contraire l'aggraver (la population s'installe dans des zones exposées au risque inondation, qui peut être accru par le changement climatique). C'est ce que l'on appelle les dommages contextuels ou *socially contingent damages* [Eyre et al., 1999]. Dans ce contexte, deux questions vont se poser :

- dans quelle mesure, pourra-t-on discerner dans ces événements (succession de mauvaises années pour les stations de sport d'hiver, années lourdes en catastrophes naturelles d'origine climatique, ...) la part attribuable au changement climatique de la variabilité naturelle du climat ou des tendances socio-économiques ? Dans l'attente, la tentation sera grande ou bien de les interpréter comme autant de signes avant-coureurs du changement climatique ou au contraire d'en attribuer l'origine à la variabilité naturelle du climat ou à des modes d'organisation socio-économique peu soutenables.

- dans quelle mesure, des seuils ne seront-ils pas franchis, qui mettront gravement en cause les activités économiques et les conditions d'existence des populations (par exemple, en étendant particulièrement le risque de sécheresse du fait d'une variabilité inter-annuelle accrue).

I.4. Effets de propagation et inflexion des sentiers de croissance

De cette tentative de taxonomie au travers d'un modèle simple, on peut comprendre qu'il y a loin des impacts aux dommages : c'est la résultante des impacts du changement climatique au travers des relations entre économie, environnement et société (simplifiées dans les équations de ce modèle) qui conduit *in fine* aux dommages. Une diminution de la durée de l'enneigement sur l'arc alpin n'est pas en soi un dommage du changement climatique ; elle le devient s'il était attaché une grande valeur esthétique, culturelle, patrimoniale aux paysages disparus, si les activités touristiques ne réussissent pas à se réorganiser (la bascule vers un tourisme estival ou vers d'autres activités hivernales s'opère mal, on ne trouve pas d'activités de substitution pour les actifs employés dans un secteur touristique qui réduit son extension), si elles n'en ont pas le temps (parce que le déploiement des impacts du changement climatique est trop rapide par rapport aux capacités de réaction du secteur), si les investissements ont été entrepris sans anticipation des évolutions possibles de la couverture neigeuse (on est surpris par ces évolutions et les investissements ne sont pas recouverts). Ce sont ces mécanismes que nous allons étudier maintenant.

Partant, il est possible d'identifier un premier écueil méthodologique des évaluations monétaires aujourd'hui disponibles. Ces études ont en effet cherché à estimer les conséquences d'un scénario de changement climatique comme la simple somme des impacts directs - c'est à dire tous les points d'entrée que nous avons présentés à la section précédente et qui sont le reflet de la vulnérabilité au changement climatique des activités productives, de l'environnement et des implantations humaines - et ce, en suivant une approche d'équilibre partiel. Elles n'ont donc pas pris en compte dans leur évaluation, comme l'aurait permis une approche d'équilibre général, la résultante sur les volumes produits, sur les prix, sur les niveaux d'investissement, de la diffusion de ces impacts directs au long des relations entre environnement, activités productives et décisions des agents. C'est l'origine de la critique formulée par Fankhauser [Fankhauser, 1994] à l'encontre de l'approche *énumérative*, suivie dans la majorité des cas. Une telle approche n'est pas à même de traduire les effets de synergie entre impacts du changement climatique et les effets de leur propagation (atténuation, amplification) dans les systèmes socio-économiques. Une approche d'équilibre général devrait essayer de prendre en compte en plus des coûts *directs* du changement climatique les coûts *indirects*, imputables aux interconnexions d'une économie.

L'approche énumérative en effet ne peut par nature tenir compte des effets de synergie entre type d'impacts. Elle évaluera de manière isolée les impacts sur le secteur agricole des impacts sur les ressources en eau. Or, dans l'hypothèse où le changement climatique se traduit par une diminution de l'abondance des ressources en eau voire l'apparition d'un risque de sécheresse estivale, l'approche énumérative négligera dans les impacts sur le secteur agricole ceux qui proviendront d'une tension pour l'accès à l'eau (compétition avec d'autres usages, renchérissement du prix) alors même qu'ils ne seront pas systématiquement négligeables pour

ce secteur (on pense par exemple aux zones agricoles de production intensive irriguée, comme les *huertas* en Espagne).

De même pour les effets de propagation. Supposons que seule l'agriculture soit vulnérable au changement climatique, une mesure correcte des dommages ne peut pas être la seule perte de production nette du secteur agricole à la suite d'une baisse de la productivité imputable au changement climatique.

Après tout, il peut exister des phénomènes de compensation au long de la filière agroalimentaire : si la production agricole baisse dans une région, il est toujours possible de faire appel aux importations ; les exploitants agricoles peuvent adapter les systèmes de production (s'ils ne sont pas *surpris* par le changement climatique et s'ils disposent des ressources techniques et financières nécessaires) ; on peut assister à des conversions d'activité. Dès lors, même si le secteur agricole de cette région semble *a priori* vulnérable, il peut se faire qu'*in fine* l'économie soit capable de faire face à cet impact à première vue défavorable.

A l'inverse, une baisse des rendements des cultures peut entraîner des conséquences économiques et sociales très lourdes pour les populations exposées. Par exemple, dans les estimations de Mendelsohn [*Mendelsohn et al.*, 1997], le secteur agricole en Afrique souffre (en raison du changement climatique) d'une perte de production de 132 milliard US\$, soit 4,7% du PIB régional. Vu la difficulté d'accès de certains pays aux marchés internationaux, certaines communautés vulnérables, comme les *urban poors* ou les communautés rurales qui vivent souvent de l'agriculture vivrière, ne pourront peut-être plus satisfaire leurs besoins fondamentaux. En même temps, le bilan peut inclure chômage, déplacement des populations vers la périphérie des villes. C'est par exemple ce qui ressort de l'étude de l'IIASA sur changement climatique et vulnérabilité de l'agriculture [*Fischer et al.*, 2002]. Bien que le degré d'autosuffisance alimentaire dépende très fortement des scénarios de développement socio-économique envisagés, le changement climatique aggravera vraisemblablement les questions de sécurité alimentaire en Afrique sub-saharienne. Ainsi, pour le scénario A2, les individus risquant de souffrir de mal-nutrition et de sous-alimentation représentent quelques 768 millions de personnes dans le scénario de référence auquel il faut rajouter entre 50 à 175 millions de personnes (hausse de 7 à 23%) du seul fait du changement climatique.

En dehors de la modification des volumes disponibles et des prix relatifs de certains produits essentiels, comme les denrées alimentaires, le point important est que l'accélération de l'obsolescence du capital en place et la baisse de productivité du capital naturel auront une influence sur les dynamiques économiques de long-terme, en particulier sur les dynamiques d'investissement. Et c'est là un deuxième écueil méthodologique des évaluations monétaires des impacts. Ces études ont en effet cherché à estimer les conséquences d'un scénario de changement climatique sur la production *annuelle* d'une région sans évaluer comment évolue le niveau d'investissement. Certes, elles donnent des informations sur les pertes en bien capital (qu'elles comparent d'ailleurs au revenu annuel) mais ne donnent pas d'estimation des conséquences à plus long-terme.

Or si les impacts sont significatifs, la production atteint un niveau plus faible que la production « de référence » et une partie de l'épargne et de la consommation sont affectées à des travaux de réparation et des investissements de protection. L'investissement pour la production du bien de

consommation courante est donc plus faible que dans un scénario « de référence »²⁷. Il est bien sûr difficile de fournir une quelconque estimation pour ce type de mécanisme²⁸ mais il faut bien comprendre qu'un euro perdu en capital a sur la croissance économique un impact plus important qu'un euro perdu sur la consommation courante.

A côté de cas exceptionnels où le changement climatique pourrait être un frein supplémentaire au développement²⁹, les seuls chiffres disponibles qui permettent une première estimation des coûts de réparation sont donnés par le secteur de l'assurance (ceci étant vrai surtout pour les pays développés). Par ailleurs, selon des évaluations de Tol [Tol, 1995], reprises par l'assureur Munich Re, les dépenses de protection des côtes contre la montée du niveau de la mer et les investissements d'adaptation entrepris dans le domaine de la gestion des ressources en eau pourraient atteindre à partir de 2050 un montant annuel respectivement de 1 milliard *US\$* et 14,7 milliard *US\$* pour l'Union Européenne.

Mais surtout, dans une économie mondialisée où les phénomènes de confiance et de défiance se propagent avec une grande rapidité, il se peut que la couche additionnelle apportée par les désordres climatiques (craints ou avérés) soit suffisamment significative soit pour affecter la confiance des décideurs économiques et des populations dans des régions durement touchées (et risquer d'en détourner les investisseurs, ce qui pour le secteur touristique de certains PVD pourrait être dramatique), soit pour induire une *grande peur* du changement climatique et de ses conséquences qui conduise à surinvestir dans les dépenses de protection. Bien sûr, une demande accrue de biens et services qui relèvent des stratégies d'adaptation (assurance, BTP, santé, eau) participe de la croissance mais celle-ci sera peut-être moins dynamique que dans une situation où moins de financement est détourné vers ces seuls secteurs.

[Fankhauser et Tol, 2002] se sont livrés récemment à une exploration analytique et numérique des liens entre changement climatique et croissance. Sur la base d'un modèle de croissance à un seul bien et à une seule région, ils étudient deux mécanismes par lesquels le changement climatique pourrait affecter les sentiers de développement : d'une part, dans l'hypothèse où le taux d'épargne reste identique à une situation sans changement climatique, comment la dynamique d'accumulation du capital est modifiée en raison d'une baisse de la production (Φ) et d'une accélération de l'obsolescence du capital productif (Ψ) sous l'effet du changement climatique (effet capital) et d'autre part, dans l'hypothèse d'anticipation parfaite des agents, comment le comportement d'épargne est adapté en prévision des impacts du changement climatique (effet d'épargne, qui se superpose à l'effet capital).

²⁷ C'est d'ailleurs un obstacle méthodologique important lors de l'écriture de scénarios socio-économiques. La pratique actuelle (par exemple, la famille SRES) consiste à projeter un scénario économique de référence, d'en dériver des émissions et des coûts des politiques de réduction des émissions et des politiques d'adaptation, *en supposant que ce scénario n'est pas affecté par les dommages*. Sans bien sûr se référer à l'éventualité d'une catastrophe climatique à grande échelle, il n'en reste pas moins vrai que les dommages pourraient au moins avoir un impact lourd sur le développement de certaines régions vulnérables.

²⁸ Par exemple, l'impact des deux tempêtes de l'hiver 1999-2000 sur la croissance française est controversé (a-t-elle eu un effet de relance ?). De même, si les instituts de conjoncture allemands estiment que les inondations du mois d'août 2002 (pertes s'élevant à 9,2 milliards d'euros) sont responsables d'un ralentissement de l'activité économique cette même année évalué à 1 milliard d'euro (soit 0,05% du PIB de 2001), à plus long-terme, leurs prévisions laissent croire que cet événement n'aura pas d'impact notable [Münich Re, 2003]. Cependant, la répétition de tels événements pourrait infléchir la dynamique économique des régions qui les subissent.

²⁹ Par exemple, la Banque Mondiale estime qu'en 2050 l'atoll de Tarawa dans l'Archipel des Kiribati pourrait faire face du fait du changement climatique à des impacts représentant 13 à 27% du PIB actuel de l'archipel entier, archipel faisant face à des coûts de l'ordre de 17 à 34% du PIB actuel [World Bank, 2002a].

Leurs résultats analytiques montrent que l'effet capital est toujours négatif : à taux d'épargne constant, le changement climatique contribue à faire décroître le stock de capital dans l'hypothèse où il affecte négativement la production et accélère l'obsolescence du capital installé. En revanche, l'effet d'épargne est ambigu : d'un côté, les agents peuvent décider d'épargner davantage pour compenser les pertes futures de revenu et de bien capital (effet capital) ; de l'autre, étant donné que la productivité du capital est affectée négativement par le changement climatique, les agents peuvent décider d'épargner moins puisque le retour sur investissement est plus faible.

Une exploration numérique à partir d'une version dérivée du modèle *DICE* [Nordhaus, 1994b] suggère que l'effet capital est de loin le plus important et que l'effet d'épargne, beaucoup plus faible, est majoritairement négatif, c'est à dire que face au changement climatique, les agents préfèrent augmenter la consommation courante plutôt qu'épargner davantage pour compenser les dommages futurs. Il semble donc que ces deux effets jouent dans le même sens et contribuent ainsi à affaiblir les perspectives de croissance. Une première quantification de ces effets dynamiques indique qu'à moyen- long-terme (à partir de 2050), ils sont d'un ordre de grandeur équivalent aux impacts directs du changement climatique et se traduisent par un ralentissement de la croissance, en particulier quand il s'agit d'un processus endogène (prise en compte du capital humain ou de la R&D).

Ces résultats préliminaires indiquent donc que les estimations des impacts, statiques et à moyen-terme, sous-estiment vraisemblablement les conséquences du changement climatique en omettant les impacts sur la croissance. Cependant il s'agit de résultats encore très provisoires, en ce sens qu'ils n'étudient pas les aspects distributifs (différences entre pays riches et pays en développement, influence d'autres facteurs -éventuellement sensibles au changement climatique- comme le commerce international), n'intègrent pas l'effet des politiques climatiques sur la croissance (ces calculs sont opérés pour un scénario avec changement climatique mais sans intervention) et finalement ne prennent pas en compte l'interaction entre incertitude et comportement d'épargne (épargne de précaution, perte de confiance des investisseurs pour certaines régions ou certains secteurs).

Cette première section a été consacrée à un panorama des risques que fait peser le changement climatique. Pour ce faire, nous avons opéré une distinction entre :

- trois grandes familles d'impacts directs (la dégradation du capital naturel, une obsolescence accrue des infrastructures et du capital productif et une altération des aménités offertes par l'environnement), que les études d'impacts nous ont permises d'illustrer abondamment,
- et leurs répercussions aux travers des tissus économiques et sociaux qui conduisent aux dommages, pour lesquels nous avons dû nous limiter à des exemples qualitatifs ou à des approches exploratoires parce que les études manquent sur ce point (et on va le voir à la section suivante, cet écart entre évaluations des impacts et évaluations de leurs conséquences socio-économiques reste manifeste).

Ce faisant, en insistant sur les nombreux chemins qui conduisent des impacts aux dommages, nous avons commencé à pointer toutes les difficultés de leur évaluation. Nous en poursuivons l'examen de manière systématique à la section suivante.

II. Les dommages au risque de l'évaluation

La taxonomie que nous venons de commenter permet de détecter les diverses modalités de transformation des impacts en dommages climatiques. Elle a donc une valeur heuristique mais pour la transformer en outil fiable d'évaluation des dommages, il est nécessaire de la nourrir plus avant à partir des résultats des études d'impacts afin de caractériser pour chaque région, pour chaque secteur la nature des relations Φ , Ψ et Ξ et les préférences des populations. Dans la section précédente, nous avons déjà souligné deux limites importantes de ces évaluations: une approche sectorielle et un cadre d'analyse statique. Nous poursuivons dans cette section la présentation de leurs insuffisances pour conclure que nous sommes aujourd'hui bien loin de disposer d'un tel outil, capable d'explorer les conséquences des scénarios de changement climatique et d'éclairer la décision publique. Auparavant, nous consacrons une section préliminaire à un rapide historique de l'évaluation des dommages.

II.1. Un bref historique de l'évaluation des dommages du changement climatique

Dès la création du GIEC, un groupe de travail, le deuxième en l'occurrence, est spécifiquement consacré à l'évaluation des impacts du changement climatique. Depuis 1990 donc, les trois rapports du deuxième groupe de travail [McCarthy *et al.*, 2001; Tegart *et al.*, 1990; Watson *et al.*, 1996] (ainsi qu'un rapport spécial en 1998 [Watson *et al.*, 1998]) ont fait état de l'avancée de nos connaissances sur ce point en recensant une masse toujours croissante d'études régionales et sectorielles détaillant les impacts potentiels du réchauffement. C'est beaucoup plus tard cependant que débutent les tentatives d'évaluation des conséquences de ces impacts sur les économies régionales et les populations. Ainsi, quand paraît le deuxième rapport du GIEC, près de 500 pages sont consacrées aux études d'impacts montrant ainsi tout leur développement - aboutissant 5 ans plus tard à un rapport sur la question de plus de 1000 pages - tandis que l'évaluation des dommages est cantonnée dans le deuxième rapport à un chapitre de quelques 50 pages³⁰ et est à peine abordée dans le troisième rapport du GIEC³¹, sinon pour en souligner les limites (au chapitre XIX). Ainsi, si la science des impacts continue de proliférer, la science des dommages marque bien des hésitations.

II.1.1. Une première génération de travaux

Cinq études seulement, qui sont les premières évaluations des dommages, sont présentes dans le deuxième rapport du GIEC (Tableau I-1). Bien sûr dans les sections du chapitre consacré aux dommages par secteurs (agriculture, zones côtières, forêts, ressources en eau,...) ou par régions, de nombreux exemples d'impacts dont les conséquences pour une activité économique ou pour certaines sociétés pourraient être significatives sont exposés mais ces cinq études sont les seules tentatives d'évaluer les conséquences économiques et sociales des impacts et de les

³⁰ «Chapitre VI - Coût social du changement climatique : dommages dus à l'effet de serre et bénéfices de la maîtrise des émissions », D.W. Pearce, W.R. Cline, A.N. Achanta, S. Fankhauser ; R.K. Pachauri ; R.S.J. Tol ; P. Vellinga.

³¹ Les estimations des dommages alors disponibles (cf Tableau I-3) ne sont d'ailleurs pas reprises dans le rapport de synthèse [Watson *et the Core Writing Team*, 2001].

exprimer selon une seule métrique, monétaire, pour les comparer aux coûts des politiques d'adaptation et de réduction des émissions de GES.

Tableau I-1. Evaluation monétaire des impacts pour l'économie américaine au moment du doublement de la concentration atmosphérique de CO₂ (montants annuels exprimés en milliards de dollars, année de référence 1990)

Type de dommages	Nordhaus		Titus	Cline	Fankhauser	Tol
	Réchauffement	+3°C	+4°C	+2,5°C	+2,5°C	+2,5°C
Agriculture		1,1	1,2	17,5	8,4	10,0
Sylviculture		faible	43,6	3,3	0,7	-
Disparitions d'espèces		a		4,0	8,4	5,0
Zones côtières		12,2	5,7	7,0	9,0	8,5
Electricité		1,1	5,6	11,2	7,9	-
Chauffage non électrique				-1,3	-	-
Agrément pour l'homme					-	12,0
Morbidité humaine				a	-	-
Mortalité humaine			9,4	5,8	11,4	37,4
Migration				0,5	0,6	1,0
Ouragans				0,8	0,2	0,3
Construction				d	-	-
Activité de loisirs				1,7	-	-
Ressources en eau		b				
disponibilité			11,4	7,0	15,6	-
pollution			32,6		-	-
Infrastructures urbaines				0,1	-	-
Pollution de l'air						
ozone troposphérique			27,2	3,5	7,3	-
autres				d	-	-
Climatisation			2,5	-	-	-
TOTAL		55,5	139,2	61,1	69,5	74,2
% du PIB (1990)		1,0	2,5	1,1	1,3	1,5

a : coûts qui ont été identifiés mais non estimés.

b : catégories non évaluées estimées à 0,75% du PIB.

Si le total agrégé de ces différentes études donne, pour un réchauffement de l'ordre de +2,5°C à +3°C au moment du doublement de la concentration pré-industrielle de CO₂, des chiffres relativement similaires, il en est tout autrement dès que l'on regarde les différentes catégories d'impacts. Par exemple, les zones côtières sont chez Nordhaus plus beaucoup plus vulnérables que chez Cline, Fankhauser ou Tol ; de même, la mortalité humaine pour Tol est au moins trois fois supérieure aux estimations des autres auteurs, etc. Ces divergences à l'échelle sectorielle, rejets des très grandes incertitudes en présence, incitent à considérer avec beaucoup de précaution les résultats de ces travaux.

Source : [Cline, 1992; Fankhauser, 1995; Nordhaus, 1991; Titus, 1992; Tol, 1995], d'après [Bruce et al., 1996], Table 6.4.

L'étude de William Nordhaus [Nordhaus, 1991] fait figure de pionnier. Elle se concentre essentiellement sur le secteur agricole et les régions côtières pour les Etats Unis et y estime les dommages de l'ordre de 0,25% du PIB pour un réchauffement d'une amplitude de 3°C. Pour tenir compte des impacts marchands omis ou non quantifiés et des impacts non-marchands, Nordhaus élève cette valeur jusqu'à 1% du PIB avec un intervalle d'incertitude de 0,25% à 2%

du PIB. Cette estimation a été obtenue pour les seuls Etats-Unis mais Nordhaus estime qu'elle peut être transférée au monde dans son ensemble en la portant à 1,3% du revenu mondial³².

Des raffinements à cette étude ont été apportés par Cline [*Cline*, 1992] et Titus [*Titus*, 1992], mais seulement dans le cas des USA. Comme on peut le constater Tableau I-1, les deux auteurs ont cherché à étendre la gamme des secteurs étudiés et ont évalué les dommages pour des réchauffements différents de Nordhaus (respectivement, +2,5°C et + 4°C). Les deux dernières études [*Fankhauser*, 1995; *Tol*, 1995] marchent aussi sur les pas de Nordhaus mais elles essaient cette fois de donner des estimations pour différentes régions du monde, au-delà des USA (Tableau I-2).

Les résultats présentés au Tableau I-1 et au Tableau I-2 appellent au moins trois commentaires que nous reprendrons de manière plus approfondie au moment d'en présenter les limites.

Tout d'abord, de telles études n'échappent à la critique formulée à la section précédente : elles ont suivi une approche d'équilibre partiel dans un cadre d'analyse statique. Les dommages sectoriels sont évalués comme l'impact sur un secteur (perte de productivité agricole en % du rendement moyen) multiplié par sa taille dans l'économie (sa part dans le PIB national) et le dommage total est la simple somme de chacune des catégories ; cette méthode, nous l'avons vu, ne prend pas en compte au delà des impacts directs les coûts indirects du changement climatique, imputables aux interconnexions de l'économie³³. De même, ces études ne replacent pas la question des dommages dans une perspective dynamique : l'évaluation est opérée à une seule date (au moment du doublement de la concentration préindustrielle de CO₂, qui se produit dans les scénarios utilisés vers 2050).

Ensuite, ces estimations s'appuient sur des chiffres extrapolés de la situation des USA au moyen d'un certain nombre d'hypothèses *ad hoc* pour traduire les différences de vulnérabilité entre pays. Par exemple, pour ce qui concerne les dommages aux régions côtières, Nordhaus fait l'hypothèse que la vulnérabilité (en % du PIB) est une fonction de la racine carrée du ratio surface côtière/surface de la région³⁴. Cependant, évaluer les dommages en Chine ou en Afrique à partir du cas des USA paraît difficilement justifiable : en effet la vulnérabilité n'est pas seulement l'affaire de particularités géographiques ou sociales (dont les hypothèses précédente essaient de rendre compte) mais aussi de l'intensité du changement climatique subi par la région et de ses capacités d'adaptation.

Enfin, dans ces études, il n'y a aucune place pour des risques climatiques importants comme une interruption de la circulation thermohaline.

³² Cette vulnérabilité plus importante du reste du monde s'explique ici par la part plus importante des activités agricoles dans le revenu (voir [*Nordhaus*, 1994b]).

³³ Ainsi, Nordhaus écrit-il : "For simplicity, we assume that there is no impact of different policies or of climate change on relative prices, so impacts can simply be summed across different sectors" ([*Nordhaus*, 1994b], p. 51).

³⁴ Ainsi une région dont le rapport des zones côtières (c'est à dire les étendues de terre comprises entre le littoral et une limite de 10 km à l'intérieur du territoire) à la superficie totale est quatre fois plus élevé que les Etats Unis connaîtra un dommage (en % du PIB) lié à la hausse du niveau des mers deux fois supérieur à celui des USA.

Tableau I-2 Dommages exprimés en termes monétaires, résultant d'un doublement de la concentration de CO₂ dans les différentes régions du monde (dommages annuels)

Région	Fankhauser		Tol	
	Md US\$	% PIB	Md US\$	% PIB
Union européenne	63,6	1,4		
Etats Unis	61	1,3		
Autres pays membres de l'OCDE	55,9	1,4		
OCDE Amérique			74,2	1,5
OCDE Europe			56,5	1,3
OCDE Pacifique			59,0	2,8
Total OCDE	180,5	1,3	189,5	1,6
Europe de l'Est/CEI	18,2	0,7	-7,9	-0,3
Economies planifiées d'Asie	16,7	4,7	18,0	5,2
Asie du Sud et du Sud-Est			53,5	8,6
Afrique			30,3	8,7
Amérique latine			31,0	4,3
Moyen-Orient			1,3	4,1
Total non-OCDE	89,1	1,6	126,2	2,7
TOTAL mondial	269,6	1,4	315,7	1,9

A l'exception notable de l'Europe de l'Est (Tol), toutes les régions connaissent des pertes du fait du changement climatique (dans les deux cas, réchauffement de +2,5°C). Dans l'ensemble, les pays en développement souffrent plus que les pays développés.

Source : [Fankhauser, 1995; Tol, 1995], d'après [Bruce et al., 1996], Table 6.6.

II.1.2. Les trois études de la seconde génération

C'est pour répondre à certaines de ces critiques et dépasser les nombreuses imperfections de cette première génération de travaux, qu'une seconde génération d'études a vu le jour (Tableau I-3).

Ainsi, les travaux de Nordhaus [Nordhaus, 1998] qui s'appuient maintenant sur 13 régions, bénéficiant des progrès de la science des impacts en particulier dans les pays en développement. En même temps, cette nouvelle étude donne plus de place aux dommages non-marchands (écosystèmes menacés, impacts sur la santé humaine) en dépit des difficultés méthodologiques liées à la valorisation des écosystèmes et des très grandes incertitudes qui demeurent sur les conséquences d'un niveau de réchauffement donné et sur leurs facultés d'adaptation. Surtout, Nordhaus tente dans la mesure du possible de se départir d'une évaluation *bottom-up* des dommages (c'est à dire partir des impacts et remonter aux conséquences sur le bien-être), approche qu'il reconnaît hors de portée pour le moment de suivre, en faveur d'une évaluation *top-down* des dommages (c'est à dire à partir des informations très incertaines sur les impacts, tenter de révéler les consentements à payer pour éviter les risques du changement climatique).

Tableau I-3. Estimations régionalisées des impacts du changement climatique : montants annuels exprimés en % du PIB régional

Région	Réchauffement	Mendelsohn <i>et al.</i>		Nordhaus <i>et al.</i>	Tol	
		+1,5°C (a)	+2°C (b)	+2,5°C (a)	+2,5°C	+1°C
Am. du Nord			0,3		3,4 (1,2)	
	<i>USA</i>			0,3	-0,5	
OCDE Europe			0,4		3,7 (2,2)	
	<i>UE</i>				-2,8	
OCDE Pacifique					1,0 (1,1)	
	<i>Japon</i>			-0,1	-0,5	
Europe de l'est/CEI					2,0 (3,8)	
	<i>Europe de l'est</i>				-0,7	
	<i>Russie</i>		1,1	11,1	0,7	
Moyen Orient					-2,0	
Am. latine			-1,3		-0,1 (0,6)	
	<i>Brésil</i>			-1,4		
Asie du sud et sud-est			-0,8		-1,7 (1,1)	
	<i>Inde</i>			-2,0	-4,9	
Chine			0,4	1,8	-0,2	
Afrique			-4,7		-3,9	
Pays développés		0,12	0,1	0,03		
PVD		0,05	-0,8	-0,17		
Total Mondial						
pond. PIB		0,09	-0,3	0,1	-1,7	2,3 (1,0)
pond. Population					-2,2	
prix moyens mondiaux						-2,7 (0,8)
pond. équité						0,2 (1,3)

Les nombres positifs (resp. négatifs) désignent des bénéfices (resp. des pertes). Ces estimations sont largement incomplètes et entachées de très fortes marges d'incertitude : les chiffres donnés par Tol (écart-type) sont en fait des bornes inférieures de l'incertitude en présence. En conséquence, les évaluations peuvent être très divergentes à l'échelle régionale : pour un même réchauffement (+2,5°C), les mêmes régions sont tour à tour bénéficiaires ou très exposées.

Dans la partie inférieure du tableau, est calculé un impact résultant mondial. Dans tous les cas, il s'agit d'un chiffre faible. On peut constater que selon les considérations d'équité qui président à la procédure d'agrégation, ce total peut changer de signe (Tol).

Source : Mendelsohn *et al.* (a [Mendelsohn *et al.*, 2000], b [Mendelsohn *et al.*, 1997]), Nordhaus *et al.* [Nordhaus *et Boyer*, 1999], Tol [Tol, 1999a, b], d'après [McCarthy *et al.*, 2001], Table 19-4.

Laissons-le présenter sa démarche : “*This approach is taken because the author believes that comprehensive regional estimates of impacts are unlikely to be available in the near future. Moreover, scholars are gravitating toward the view that it is the risks that are the major cause for concern about future climate change. The WTP approach estimates the ‘insurance premium’ that different societies are willing to pay to prevent climate change and its associated impacts. The advantage of the WTP approach is that it can encompass different approaches to measuring impacts (including surveys as well as statistical impact measures)*” [Nordhaus, 1998] (p. 3). Comme le laisse entendre la dernière phrase, dans la pratique, l'évaluation des dommages entreprise mêlera à la fois des évaluations *bottom-up* (pour l'agriculture ou les régions côtières) et des évaluations *top-down* (par exemple, pour les écosystèmes, la santé humaine et les catastrophes climatiques).

On mélange donc deux niveaux logiques, celui où on se lance dans une investigation qu'on espère la moins incertaine possible des impacts et de leurs conséquences sur le bien-être pour opérer une analyse coût-bénéfice, et celui où l'on cherche à évaluer le consentement à payer pour éviter ou réduire un risque dont on n'a qu'une image diffuse. Par ailleurs, l'absence de données sur les consentements à payer pour beaucoup d'événements et nombre de régions laissent la place à nouveau à un ensemble d'hypothèses qui peuvent en pratique relever de l'arbitraire. De même, on n'évalue pas à proprement parler de primes de risque ou de prix d'option car toutes les évaluations des consentements à payer sont entreprises en univers certain : on cherche à estimer combien la population de telle région serait prête à payer pour éviter tel impact (régression des écosystèmes, impacts sur la santé) et non pas quelle est sa prime de risque sachant que le risque de régression des écosystèmes a telle distribution ou combien elle serait prête à payer pour se couvrir complètement contre un risque donné (prix d'option).

Enfin, dans la présentation de ses résultats agrégés à l'échelle mondiale, Nordhaus introduit deux types de pondération pour rendre compte de l'inégale répartition des dommages, qui sont majoritairement supportés par les régions les plus pauvres et les plus peuplées : d'un côté, une pondération par le PIB régional (réalisé en 2100 dans le scénario de référence de RICE-99) qui donne plus d'importance aux pays riches et de l'autre, une pondération par la population régionale (référence 1995) qui donne plus d'importance aux pays en développement. Si le total mondial n'est que peu différent dans les deux cas (une perte de l'ordre de 2% du revenu mondial), la composition sectorielle (Figure I-2), elle, est différente, reflétant par là les différences de vulnérabilité entre pays développés et pays en développement. Par exemple, les impacts sur la santé humaine ou les secteurs de l'économie autres que l'agriculture sont beaucoup plus prononcés dans les pays en développement tandis que la valeur des aménités - seul bénéfice à en croire l'étude - est (comme on pouvait l'attendre) beaucoup plus importante dans les pays développés. De même (Figure I-3), l'importance relative des dommages régionaux dans le total diffère selon la pondération utilisée, traduisant par là l'étendue des risques pour les populations des pays en développement. Ainsi, l'Inde, l'Afrique, la Chine et les autres régions où le revenu par tête est le plus bas, qui comptent pour seulement 40% du dommage mondial avec une pondération par le PIB régional, représentent 75% du dommage mondial avec une pondération par la population.

Richard Tol [Tol, 1999a, b] de son côté poursuit l'approche énumérative qu'il avait entreprise auparavant [Tol, 1995]. Il restreint son analyse à sept catégories de dommages (l'agriculture, la sylviculture, les zones côtières, la santé, les écosystèmes, les ressources en eau et l'énergie) et sept régions. Son analyse a le mérite de s'appuyer sur une littérature très approfondie des études d'impacts et c'est cela qui guide principalement le choix des secteurs retenus.

Figure I-2. Dommage mondial (en % du PIB mondial) par catégories d'impact, pour deux types d'agrégation (Source : [Nordhaus et Boyer, 1999]).

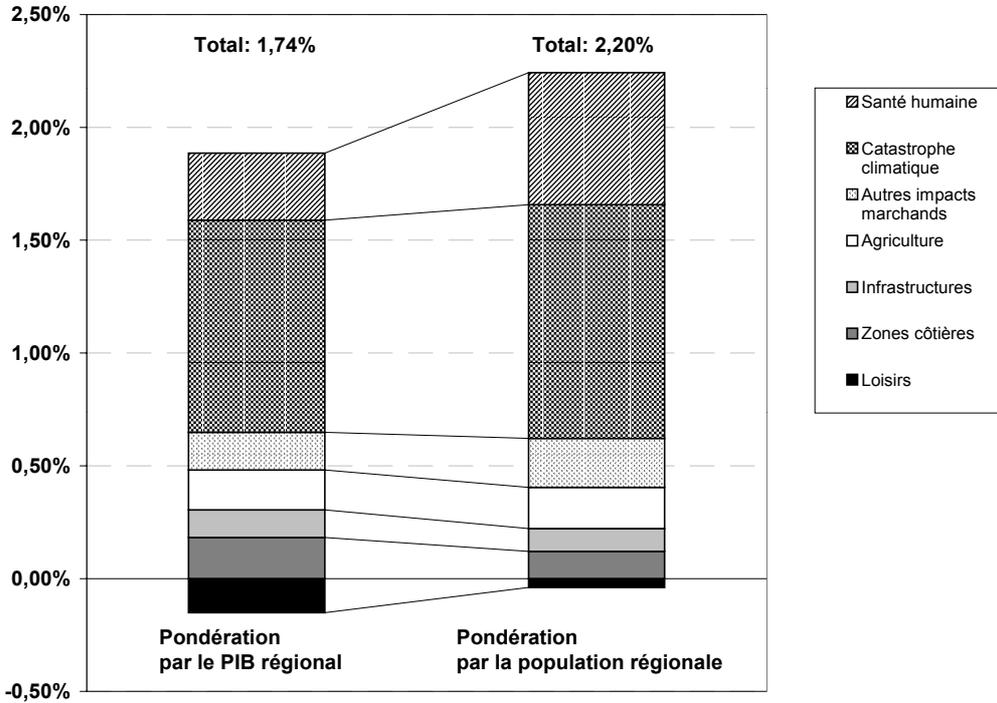
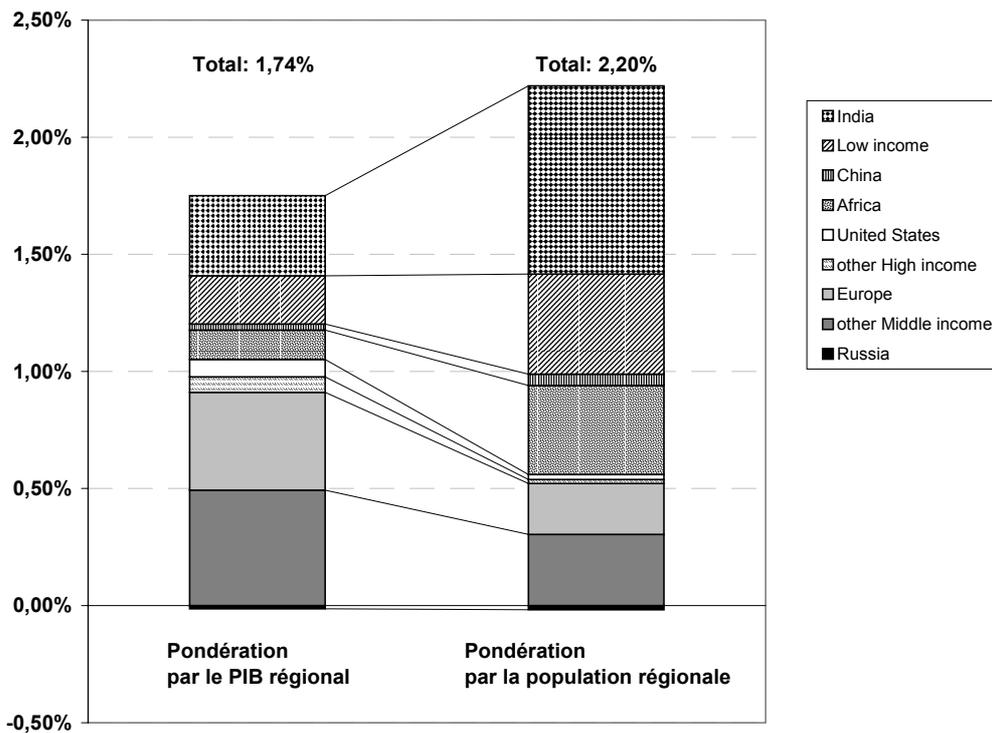


Figure I-3. Dommage mondial (en % du PIB mondial) par région, pour deux types d'agrégation (Source : [Nordhaus et Boyer, 1999]).



De plus, un des intérêts de son étude est de prendre en compte les questions d'équité intra-générationnelle (d'une manière beaucoup plus rigoureuse que Nordhaus) en faisant intervenir différentes pondérations pour comparer et agréger les dommages régionalisés. Ces pondérations cherchent à rendre compte qu'un euro perdu du fait du changement climatique n'a pas sur le bien-être les mêmes conséquences dans les pays riches que dans les pays en développement et traduisent en même temps différentes visions de l'équité intra-générationnelle (voir la présentation du modèle heuristique dans l'introduction de la section I.). Ainsi, trois techniques d'agrégation sont retenues : a) simple somme des totaux régionaux (cette règle revient en fait à considérer que l'unité marginale d'une unité monétaire dans n'importe quelle région est identique ; on la retrouve par exemple si l'agrégation des utilités régionales est opérée selon des poids de Negishi - c'est à dire en considérant que la distribution du revenu observée ou projetée est celle qui permet d'atteindre l'optimum social³⁵ ; b) valorisation des impacts en dommages en faisant intervenir des prix moyens mondiaux (par exemple, en donnant à la valeur statistique de la vie humaine une valeur moyenne sur tous les continents) ; c) agrégation des utilités régionales en utilisant la taille des populations (ce qui correspond à une sorte de démocratie universelle : « *Un homme, un vote* »). On peut remarquer (Tableau I-3) que selon les différentes considérations d'équité qui président à l'agrégation des dommages régionaux, l'amplitude et le signe du dommage mondial résultant varient en effet de manière significative.

Enfin terminons cette rapide présentation des études de deuxième génération avec les travaux de Robert Mendelsohn [*Mendelsohn et al.*, 1997, 2000]. Là encore, on cherche à dépasser les limites identifiées avec les travaux de première génération. Mendelsohn suit en fait une démarche très originale : plutôt que d'estimer dans un premier temps les dommages pour dans un second temps calibrer des fonctions de dommages, il cherche d'emblée à caractériser la fonction de dommages (qu'il appelle une fonction de réponse). Ces fonctions sont en fait assez sophistiquées puisqu'elles prennent en compte l'amplitude du réchauffement et les variations des précipitations, sur une base régionale. Par ailleurs, la procédure d'estimation essaie d'intégrer l'ajustement des secteurs au changement climatique (leur niveau d'adaptation) à l'aide d'analogues spatiaux³⁶. Les catégories étudiées sont au nombre de six : l'agriculture, la sylviculture, les zones côtières, les ressources en eau, le tourisme et l'énergie. Une limite importante pour conclure : beaucoup de catégories d'impacts sont absentes et toutes les estimations sont restreintes au territoire des Etats-Unis et extrapolées au reste du monde avec des hypothèses comparables à celles employées par Nordhaus.

Comme nous le verrons, les résultats de ces trois études restent très spéculatifs. Néanmoins, ils donnent un premier aperçu des vulnérabilités sectorielles et régionales et un ordre de grandeur des impacts (directs) :

³⁵ C'est également la règle d'agrégation employée par Nordhaus quand il pondère les dommages régionaux (exprimés en % du PIB régional) par les PIB régionaux pour calculer un dommage résultant mondial.

³⁶ Pour une région ou un grand pays, on retient un certain nombre de stations représentatives de différents régimes climatiques et de différents systèmes de productions agricoles. On peut dès lors évaluer (à contexte socio-technique égal) pour un scénario de changement climatique donné, quelles évolutions du secteur agricole permettent de diminuer sa vulnérabilité au changement climatique, voire d'en tirer profit. cf. [*Mendelsohn et Dinar*, 1999; *Mendelsohn et al.*, 1994].

- Dans l'ensemble, les impacts les plus sévères sont supportés par les pays en développement. Ces régions sont particulièrement vulnérables car d'une part, leurs économies reposent sur des activités très exposées au climat (forte part du secteur agricole dans le revenu national) et opèrent déjà dans des conditions environnementales proches de leur tolérance maximale (ressources en eau, zones côtières, etc.), et d'autre part, si les tendances actuellement observées se poursuivent, ces pays manqueront des capacités techniques, financières et institutionnelles pour s'adapter [Tol et al., 2000]. A l'inverse, certains pays développés des hautes latitudes pourraient bénéficier jusqu'à un certain point du réchauffement (gain pour le secteur agricole, notamment).
- Dans l'ensemble, des impacts négatifs à l'échelle globale sont à craindre pour des réchauffements supérieurs à 2-3°C et leur intensité s'aggrave avec l'amplitude du réchauffement au-delà de ces valeurs [Smith et Hitz, 2002]. Bien sûr, de tels chiffres dépendent de la manière dont est conduite l'agrégation et un total mondial positif, qui traduit un bénéfice net à l'échelle globale, n'exclut pas en fait la possibilité qu'une majorité d'individus souffrent du changement climatique. Il n'est même légitime de parler d'une amélioration mondiale qu'à la condition que soient mis en place des mécanismes de compensation entre régions bénéficiaires et perdantes.
- Il semble que les impacts marchands soient inférieurs à leurs estimations plus anciennes (au moins dans les pays développés) du fait de l'adaptation. Cependant, les stratégies d'adaptation sont encore loin d'être correctement modélisées et l'incertitude sur les impacts comme sur l'existence de barrières techniques, financières et institutionnelles à l'adaptation pourrait conduire finalement à sur-estimer leur efficacité.
- En revanche, il semble que les impacts non-marchands soient généralement plus prononcés que ne le laissaient penser les études de première génération car beaucoup d'entre eux n'étaient alors qu'à peine quantifiés. Bien que de nombreuses incertitudes demeurent, ce serait notamment le cas pour la santé humaine, les ressources en eau et les écosystèmes.

Au moment de refermer ce panorama historique consacré aux évaluations des dommages du changement climatique et à leurs enseignements, il est légitime de saluer les efforts de recherche que nous venons de présenter. En dépit d'un grand nombre d'incertitudes et d'informations absentes (pour les régions en développement ou pour certains aspects des dommages comme la biodiversité), ces travaux ont pris le risque de mettre en perspective un ensemble très disparate d'études d'impact régionales ou sectorielles pour brosser à grands traits un tableau mondial et cohérent des visages du changement climatique et proposer une quantification monétaire des impacts.

Cette étape était un nécessaire préalable pour nourrir les modèles intégrés du changement climatique, afin d'éclairer la décision collective, sur la base d'une information scientifique harmonisée. Ces travaux marquent donc un jalon dans l'histoire de la modélisation intégrée et ils ont été, au-delà des modèles pour lesquels ils ont été entrepris³⁷, très largement repris dans la

³⁷ Ainsi, les travaux de Nordhaus pour le modèle RICE (*Regional Integrated model of Climate change*, [Nordhaus et Boyer, 1999]), ceux de Tol pour le modèle FUND (*Climate Framework for Uncertainty, Negotiation and*

littérature sinon pour écrire directement des fonctions de dommages au moins pour encadrer des ordres de grandeur sur les vulnérabilités régionales ou sectorielles. Cependant, et leurs auteurs sont souvent les premiers à les pointer, ils restent entachés d'un certain nombre de limites : en définitive, on a peu d'information sur les liens entre impacts et dommages et partant, on peut s'interroger sur la qualité de la représentation des risques climatiques dans les modèles intégrés. Ce sont ces limites que nous allons passer en revue à la section suivante.

II.2. Evaluer les dommages, apprécier les risques : des estimations incomplètes, incertaines et très controversées

En effet, étant donné que ces travaux servent de manière récurrente au calibrage des modèles intégrés du changement climatique, il importe de s'assurer de la qualité des informations sur les impacts et les dommages avant d'en tirer des conclusions définitives pour la décision collective. Par exemple, que savons nous sur la forme de la fonction de dommages ? Les déterminants-clés des impacts et des dommages sont-ils convenablement traités ? Ces études sont-elles exhaustives ? Quelle confiance pouvons-nous placer dans leurs résultats ? C'est sous cet angle que nous allons passer en revue les différentes estimations que nous avons présentées pour conclure qu'il s'agit d'évaluations ponctuelles, lacunaires, très incertaines et qu'elles donnent en définitive bien peu d'informations fiables pour nourrir un modèle intégré.

II.2.1. Des évaluations ponctuelles

Il s'agit d'estimations ponctuelles, à la croisée d'un scénario économique et d'un scénario climatique, au moment du doublement de la concentration pré-industrielle de CO₂. Pour des raisons historiques en effet, tout l'effort d'évaluation des dommages s'est presque exclusivement concentré sur les effets d'un doublement de la concentration pré-industrielle de CO₂ (c'est à dire $2 \times 280 \text{ ppm} = 560 \text{ ppm}$). C'est le cas notamment pour toutes les études de la première génération et de [Mendelsohn *et al.*, 1997, 2000] pour les études de seconde génération³⁸. Etant donné les scénarios climatiques utilisés (augmentation exogène de la concentration atmosphérique de CO₂ de 1% *par an*), le doublement se produit vers 2050-2060.

C'est un repère arbitraire en fait. Il ne correspond pas à un nouveau régime climatique stabilisé : si la concentration atmosphérique de CO₂ est maintenue à 560 ppm une fois qu'elle a atteint cette valeur, la température moyenne globale continue de s'élever, en raison de l'inertie du système climatique, jusqu'à atteindre un nouvel équilibre thermique un à deux siècles plus tard. Un ordre de grandeur est avancé dans le rapport de synthèse du GIEC (voir [Watson *et the Core Writing Team*, 2001], tableau 6.1 et figure 6.2): en suivant un profil d'émissions de GES compatible avec une stabilisation de la concentration atmosphérique de CO₂ à 550 ppm (atteinte vers 2150), l'élévation de la température moyenne globale en 2100 - la concentration est alors de 540 ppm - est comprise dans un intervalle allant de 1,5°C à 2,9°C ; elle est comprise dans un intervalle allant de 2°C à 5,2°C à l'équilibre, soit un à deux siècles plus tard.

Distribution, [Tol, 1997]) et ceux de Mendelsohn pour le modèle GIM (*Global Impacts Model*, [Mendelsohn *et al.*, 1997]).

³⁸ Nordhaus et Tol font cependant exception : [Nordhaus, 1998] estime les dommages pour un réchauffement de +2,5°C (ce qui se produit dans son scénario de référence vers 2110) et [Tol, 1999a, b] pour un réchauffement de +1°C (ce qui se produit selon les scénarios SRES entre 2030 et 2070).

Partant, de telles évaluations présentent trois limites.

Aucune estimation des impacts ou des dommages n'est donc disponible pour des niveaux de concentration de GES supérieurs à 560 ppm ni pour une amplitude du réchauffement plus élevée que +2,5°C-+3°C. Pourtant, si l'on en croit les scénarios SRES, à la fin du siècle la température moyenne pourrait s'élever bien au-delà de +2,5°C, jusqu'à +5,8°C, avec un accroissement significatif des risques (voir Figure I-1) ; de même les concentrations, avec des valeurs pouvant dépasser les 900 ppm (c'est à dire plus de trois fois la valeur préindustrielle).

De même, en n'explorant pour chacune d'entre elles qu'un seul scénario socio-économique, ces évaluations ne donnent pas d'information sur la manière dont la vulnérabilité au changement climatique est étroitement dépendante du niveau de développement effectivement atteint ni sur la manière dont le changement climatique ne pourrait être qu'un facteur aggravant d'une situation déjà défavorable. C'est à ce titre que les auteurs du projet ExternE (Externalities of Energy) développent la notion de *socially contingent damages*, qu'ils identifient comme l'une des questions-clefs de l'évaluation des dommages [Eyre et al., 1999]. Par exemple, [Tol et Dowlatabadi, 2002] concluent qu'un accroissement du revenu dans les pays en développement permettrait, grâce à la mise en place de politiques de santé publique, de réduire de manière significative la vulnérabilité des populations face à des maladies comme la malaria, dont l'incidence serait pourtant renforcée par le changement climatique ; dans les scénarios de développement les plus favorables, cette maladie pourrait même être éradiquée (assez tardivement, vers 2080). Des exemples similaires peuvent être énoncés, comme la situation des ressources en eau ou des régions côtières, la sécurité alimentaire également.

Enfin, en se concentrant sur des dommages vers le milieu du siècle, ou au maximum vers 2100, ces évaluations ne donnent aucun élément sur les risques climatiques à long-terme, comme des transitions du climat vers des régimes particulièrement défavorables (cyclones plus fréquents, sécheresse chronique, remaniement de la circulation thermohaline dans l'Atlantique nord) ou la poursuite de tendances amorcées au cours du XXIème siècle mais dont les conséquences ne sont pas encore significatives vers 2060 (submersion irréversible des territoires insulaires, poursuite des dommages aux zones côtières, transformations profondes des écosystèmes). Ainsi, en se focalisant sur les impacts au cours du siècle, les études disponibles donnent l'illusion, par un effet d'optique, que les impacts du changement climatique peuvent rester dans l'ensemble maîtrisables et sous-estiment les risques d'évolutions irréversibles aux conséquences catastrophiques (au moins à l'échelle locale) dont les dynamiques, compte tenu de l'inertie des systèmes naturels, sont déjà amorcées à partir de 2050³⁹.

II.2.2. Des évaluations selon une procédure statique

Dans la première section, nous avons souligné l'importance de replacer la question des dommages dans une perspective dynamique pour rendre compte du fait que, dans l'hypothèse où les impacts seraient significatifs, ils pourraient infléchir les sentiers de croissance en

³⁹ Par exemple, il est peut être déjà trop tard, compte tenu des émissions passées et des tendances pour les toutes prochaines décennies, pour éviter la fonte de la calotte de l'Antarctique de l'Ouest (un réchauffement de +2°C pourrait, semble-t-il, déclencher le processus) mais cette fonte ne commencerait de toute façon qu'après 2100. Son effet sur la hausse du niveau des mers (plus 4 à 6 mètres) ne se manifesterait donc que dans très longtemps [O'Neill et Oppenheimer, 2002].

détournant une part de l'épargne au profit des dépenses de réparation et d'adaptation ou en affectant la confiance des investisseurs dans des zones *a priori* menacées. Or les évaluations des dommages sont opérées à une seule date; elles ne permettent donc pas d'estimer l'effet du changement climatique sur la croissance.

Bien plus, elles correspondent aux impacts d'un climat modifié mais non d'un climat en transition plus ou moins chaotique vers un nouveau régime stabilisé. Comme l'indiquent [Schneider et al., 2000a]: "*Any exercise, which neglects surprises or assume transitivity of the earth system (i.e., a path-independent response) is therefore questionable, and should carry a warning to users of the fundamental assumptions implicit in the technique dependent on steady state results*". En particulier, elles ne prennent pas en compte l'influence du rythme du changement climatique ou du déploiement des impacts ; pourtant, un réchauffement progressif de +2°C sur une période 50 ans n'a pas vraisemblablement les mêmes conséquences qu'un réchauffement de même amplitude qui se produirait en 100 ou 200 ans⁴⁰. C'est d'ailleurs l'une des sources de préoccupation de la communauté scientifique face au phénomène : la température moyenne globale pourrait s'élever selon un rythme beaucoup plus important qu'au cours du XX^{ème} siècle (période où il a été en moyenne de 0,1°C par décennie) et sans commune mesure avec les observations et reconstitutions sur les 10 000 dernières années.

C'est donc une limite importante dont souffrent les évaluations disponibles. Hanemann se l'explique ainsi : "*[...] most economic analysis is comparative statics in nature and pays virtually no attention to the process of adjustment from one equilibrium to another. However, the largest economic impacts of climate change are likely to be those associated with the process of adjustment*" [Hanemann, 2002]. Cette dernière remarque insiste à nouveau sur la notion de trajectoire climatique : si le rythme du changement climatique ou du déploiement des impacts est trop élevé par rapport à nos capacités de réaction, les impacts aux activités économiques, aux biens, aux populations seront très supérieurs à une situation où l'évolution du système climatique est beaucoup plus lente et permet de planifier à temps des mesures d'adaptation appropriées.

II.2.3. Des évaluations lacunaires et très approximatives

Nous avons déjà souligné que finalement peu de catégories d'impacts étaient présentes dans les évaluations disponibles aujourd'hui. Par exemple, dans la liste des catégories omises, Richard Tol [Tol, 1999a] identifie entre autres le tourisme (pourtant importante source de revenus pour beaucoup de petits pays tropicaux), les ressources halieutiques, le secteur du BTP (dommages aux infrastructures), les transports. [Smith et Hitz, 2002] dans une revue récente de la littérature des impacts rappellent qu'il n'existe pas pour le moment d'études d'impacts mondiales pour le secteur de l'assurance, pour les transports, pour les infrastructures, ni pour les activités de loisir et le tourisme ni enfin pour les aménités offertes par le climat et la nature.

A ce problème d'exhaustivité des secteurs étudiés, fait écho un problème de finesse dans la description régionale des impacts. En effet, les scénarios climatiques comme les modèles d'impact sont de résolution bien trop grossière pour capturer de manière pertinente des

⁴⁰ Et par exemple, [WWF, 2000] en fait une des menaces majeures pour la biodiversité face au changement climatique.

caractéristiques essentielles de la vulnérabilité régionale et des impacts résultants⁴¹ : un certain nombre de déterminants-clés sont ainsi omis. La plupart du temps en effet, les études d'impact retiennent l'élévation de la température moyenne globale⁴² comme le seul déterminant climatique étudié alors que les impacts dépendent fortement de l'évolution du régime des précipitations ou de la variabilité du climat. Par exemple, l'évaluation des impacts sur le secteur agricole ne prend pas en compte les variations des précipitations, les températures extrêmes (maximum quotidien, nombre de jours de gel) ou l'évolution de la variabilité inter-annuelle. En effet, dans le cas de l'agriculture par exemple, négliger l'évolution de la variabilité du climat peut entraîner un risque non négligeable de sous-estimer les conséquences du changement climatique sur le bien-être à la fois parce que les impacts résultants pourraient être plus importants [Dalton, 1997] et parce que les stratégies d'adaptation entreprises pourraient être moins performantes compte tenu du bruitage entretenu par la variabilité (qui gêne la détection du signal du changement en cours) [Schneider et al., 2000b].

De plus, données et modèles d'impacts régionaux font défaut pour décrire les conséquences du changement climatique dans beaucoup de pays autres que les pays de l'OCDE. Les estimations des impacts y reposent donc soit sur quelques estimations très localisées étendues à l'ensemble de la région (qui a parfois la taille d'un continent), soit sur des estimations effectuées dans les pays de l'OCDE (principalement, les USA) et transférées dans ces régions. Dans les deux cas, c'est donc au prix d'un ensemble d'hypothèses supplémentaires que l'on peut avancer des estimations des impacts dans les pays en développement. Notre connaissance des impacts y est donc encore très fragile et nous sommes loin de disposer d'études régionales approfondies.

Enfin il s'agit aussi d'évaluations approximatives car elles ne prennent pas en compte les interactions entre secteurs (une disponibilité plus faible de l'eau peut affecter l'agriculture tandis qu'en retour la demande d'eau pour l'irrigation accroît les pressions sur la ressource) et les effets d'équilibre général qui peuvent en résulter. En particulier, aucune de ces études n'a apprécié comment de tels impacts pourraient dans des configurations défavorables conduire à des conséquences socio-économiques majeures : migrations, conflits. On pense aux tensions pour l'accès à l'eau autour du bassin méditerranéen ou à la situation des petites îles de l'Océan Pacifique et de l'Océan Indien.

II.2.4. Des évaluations très incertaines et difficilement comparables

Les évaluations des impacts pâtissent de toutes les incertitudes à l'œuvre dans le changement climatique. Rappelons les rapidement en suivant la chaîne causale qui conduit des émissions de GES aux impacts. Tout d'abord, des incertitudes liées aux projections socio-économiques de (très) long-terme : l'horizon de projection est ici au moins 2100 ce qui est un exercice plutôt inhabituel pour les économistes. Un certain nombre d'hypothèses, qui conditionnent les volumes d'émissions de GES, la vulnérabilité des sociétés et les capacités d'adaptation, doivent être formulées : elles portent sur la croissance démographique et les implantations des populations, les niveaux de développement régionaux et la nature du progrès technique, les

⁴¹ On parle là, des études d'impacts qui ont servi de base aux travaux d'évaluation globale des impacts et des dommages et pas – bien sûr – des études d'impacts, plus récentes, qui se concentrent sur un objet précis dans une aire géographique limitée et font dès lors appel à des scénarios climatiques plus riches et à des modèles d'impacts plus détaillés.

⁴² Et non pas d'ailleurs, sauf [Mendelsohn et al., 1997, 2000], l'élévation de la température régionale ; c'est à dire que tout le tableau des dommages est directement relié à une variable globale qui n'a pas de très grande signification physique.

structures des économies (part du secteur primaire, dématérialisation). Des incertitudes sur l'évolution du climat ensuite, en réponse au forçage d'origine humaine. Par exemple, dynamique du cycle du carbone (activité des puits de carbone océanique et continentaux), rôle des aérosols, rôle de la vapeur d'eau, comportement de la circulation thermohaline, projection des climats régionaux (en particulier de leur variabilité). Des incertitudes sur les modèles d'impacts enfin dont les résultats sont très sensibles aux paramétrisations retenues, à la qualité des données (quand elles sont disponibles), à la désagrégation retenue. C'est donc à une cascade d'incertitudes que les modélisateurs font face quand ils cherchent à évaluer les dommages du changement climatique. Nous listons ici quatre enjeux d'importance.

A. Vulnérabilité et adaptation

L'une des incertitudes principales, au cœur de l'évaluation des impacts, concerne l'adaptation. C'est à dire l'ensemble des stratégies mises en œuvre pour réduire notre vulnérabilité au changement climatique ou tirer profit de nouvelles opportunités : par exemple, la construction de digues, le changement des pratiques agricoles, la mise en œuvre d'un réseau de surveillance et d'alerte pour les événements climatiques extrêmes, *etc.* Les évaluations que nous avons présentées donnent les coûts des impacts cum adaptation⁴³. Selon que des hypothèses pessimistes ou optimistes sont retenues sur les potentiels d'adaptation et leur mise en œuvre effective, le montant des dommages est extrêmement variable. Il s'agit donc d'un élément clef dans l'évaluation des dommages.

Trois incertitudes sont à prendre en compte à propos du traitement des stratégies d'adaptation (nous y reviendrons au chapitre VI de cette thèse): leur potentiel réel à réduire la vulnérabilité et les coûts associés, les déterminants de leur mise en œuvre effective et les liens avec le scénario de développement.

Ainsi, la pratique courante dans les études d'impacts pour les zones côtières ou l'agriculture consiste à ne retenir qu'un petit nombre défini d'options d'adaptation ; en conséquence, les effets bénéfiques de l'adaptation pourraient être sous-estimés car certaines alternatives non représentées pourraient s'avérer plus efficaces. A l'inverse, l'approche des analogues (voir ³⁶), suivie par exemple par [Mendelsohn *et al.*, 1997], a elle tendance à surestimer l'efficacité de l'adaptation car elle néglige les coûts de transition (coûts des investissements pour passer d'un système de production agricole à un autre, en installant par exemple un système d'irrigation) et de l'apprentissage (laps de temps nécessaire pour se rendre compte d'un changement de l'environnement et pour élaborer des stratégies appropriées).

Ce dernier point soulève la question de la manière dont sont effectivement modélisées les décisions d'adaptation : à quels signaux réagit-on ?, quelles stratégies choisit-on en présence d'incertitude ? [Tol *et al.*, 1998] identifient trois grandes approches : pas d'adaptation, adaptation selon des stratégies arbitrairement choisies et adaptation selon un processus optimal (avec anticipation).

Le premier cas est un cas d'école : c'est l'hypothèse du *dumb farmer*, qui ne modifie pas son comportement alors même que l'environnement évolue (et ce, même s'il détecte ces transformations). Ce choix de modélisation permet de répondre à la question « En quoi le changement climatique sera un problème si aucune action n'est spécifiquement entreprise pour s'y adapter ? ». C'est donc une référence pour examiner la question des stratégies d'adaptation

⁴³ Elles ne donnent pas d'ailleurs le montant (ni l'échéancier) des investissements entrepris pour atteindre le niveau d'adaptation en question, éléments qui sont pourtant nécessaires dans un calcul coût-bénéfice.

et également examiner les liens entre perspectives de développement (croissance de la population, densité des implantations humaines et aménagement du territoire, pressions sur les ressources naturelles, *etc.*) et vulnérabilité au climat (cf. la question des *socially contingent damages*).

Dans le second cas, on retient un ensemble de stratégies d'adaptation (par exemple à partir d'analogues spatiaux) et on peut dès lors évaluer leur pertinence par rapport à un scénario sans adaptation et les comparer entre elles. Mais on n'examine pas précisément, dans un univers décentralisé, à quels signaux réagit un agent, comment il interprète les modifications du climat et de l'environnement (détection) et dans quelles directions il va chercher à s'adapter (anticipation), quelles stratégies il retient et quels sont leurs coûts.

C'est ce que l'on essaie de capturer dans le troisième cas. Cependant, on y fait souvent l'hypothèse d'une clairvoyance parfaite : notre fermier sait maintenant parfaitement détecter, en dépit du bruit de fond entretenu par la variabilité naturelle du climat, le signal du changement climatique, il l'interprète dans la bonne direction, il met donc en place à temps les stratégies d'adaptation optimales. Autant d'hypothèses très optimistes qui ne sont pas un reflet de la réalité et qui sur-estiment l'efficacité de l'adaptation en raison d'un changement climatique détecté tardivement (avec la difficulté de réagir vite du fait des inerties socio-économiques) ou mal anticipé (adaptation finalement non appropriée).

L'analyse de l'adaptation est encore compliquée par les liens avec les scénarios de développement. Nous avons déjà donné des exemples pour illustrer comment les tendances démographiques ou économiques pouvaient participer avec les stratégies d'adaptation à réduire la vulnérabilité ; c'est à ce titre que Schelling [Schelling, 1992] écrit à propos des pays en développement : "*Their best defence against climate change may be their own continued development*". Toujours sur ce thème, une autre question concerne les antagonismes ou au contraire les convergences entre les stratégies d'adaptation et les sentiers de développement : existe-t-il des barrières financières, scientifiques, techniques ou institutionnelles à la mise en œuvre des stratégies d'adaptation dans les scénarios de développement ? En définitive, c'est en filigrane la question de choix de développement face à l'incertitude sur les risques climatiques qui se pose : saurons-nous nous orienter dans des configurations où la vulnérabilité au changement climatique - si le risque est finalement avéré - n'est pas spontanément élevée et où la mise en place de stratégies d'adaptation n'est pas systématiquement compromise ou coûteuse, ou bien est-il déjà trop tard⁴⁴ ?

B. Précision régionale et sectorielle des études et comparabilité des estimations

Une difficulté supplémentaire de l'évaluation des impacts est notre connaissance encore incomplète du changement climatique lui-même, en particulier dès que l'on descend à l'échelle régionale. En effet (et ce n'est pas une surprise), la régionalisation des effets du changement climatique est très dépendante du modèle climatique considéré. Par exemple, une analyse des scénarios climatiques de la base CMIP montre que l'écart-type de la réponse précipitation entre les modèles est souvent plus important que la moyenne entre ces mêmes modèles [Le Treut et Serafini, 2002]. On peut s'en rendre compte par exemple Figure I-4 où ceci est particulièrement prononcé en hiver sur le bassin méditerranéen. Dès lors, on imagine aisément les tableaux des impacts très contrastés que l'on obtiendra selon le scénario climatique utilisé.

⁴⁴ Pour un exemple de l'effet de verrouillage, conditionnant une très forte vulnérabilité au risque climatique et des coûts d'adaptation de plus en plus élevés, voir [Burnouf, 2003] sur la gestion du risque inondations et l'aménagement du bassin du Rhône.

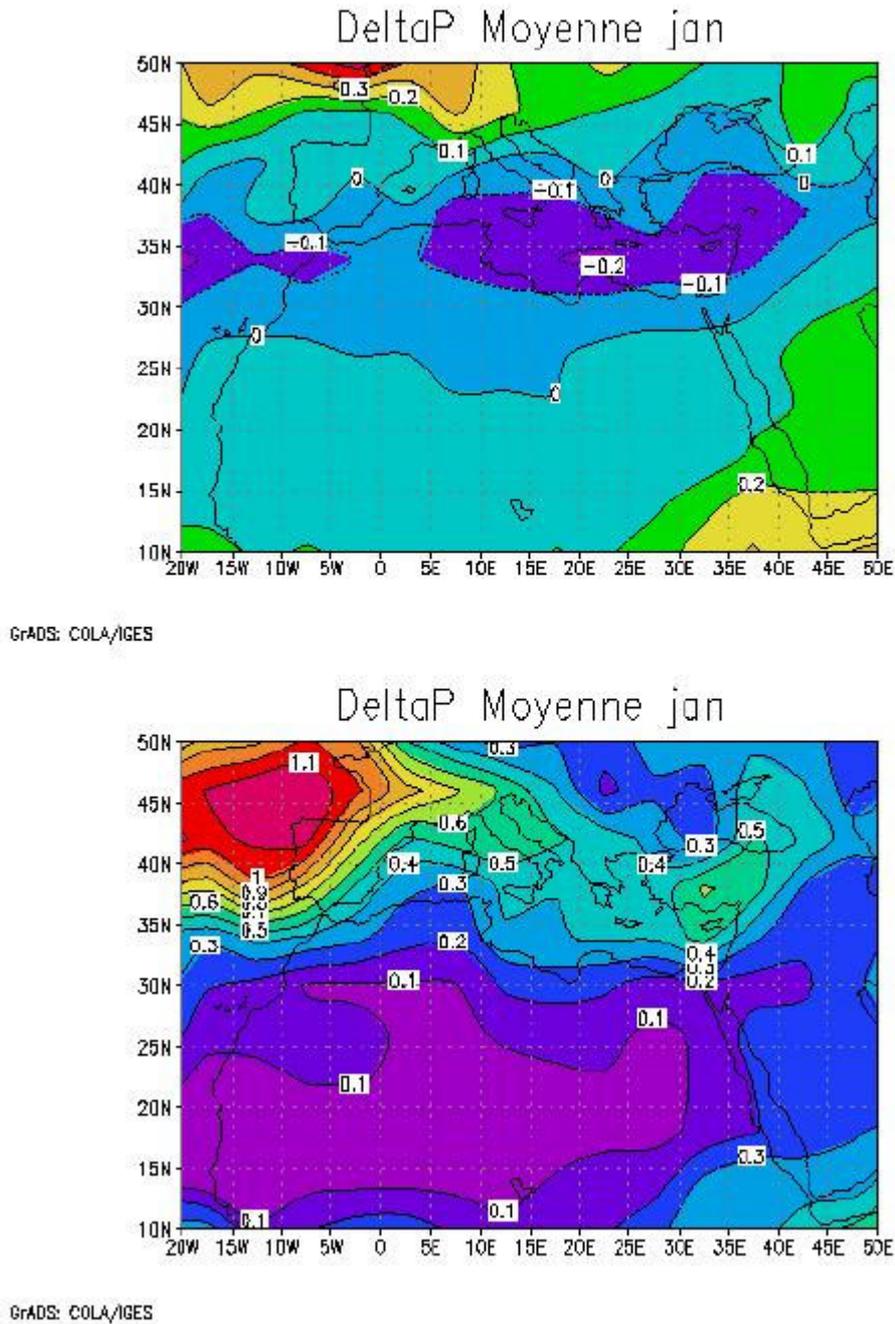


Figure I-4. Modification moyenne des précipitations sur l'Europe et l'Afrique de l'Ouest.

Moyenne des modèles CMIP pour le mois de janvier (en mm/jour, en haut) et écart-type de la réponse de différents modèles (en mm/jour, en bas) vers 2060 pour une hausse de la concentration atmosphérique de CO₂ à un rythme annuel de 1%.

Nous avons précédemment indiqué d'autres limites qui rajoutent chacune une couche supplémentaire d'incertitude dans l'évaluation régionale des impacts : échelle spatiale et temporelle des scénarios climatiques et des modèles d'impacts inadaptée, oubli de déterminants-clés des impacts, relative insuffisance des modèles sectoriels ou régionaux utilisés, absence d'expertise pour les pays en développement.

Beaucoup d'équipes de modélisation intégrée tentent de remédier à cette situation en développant des modèles sectoriels ou régionaux plus pertinents pour examiner les impacts du changement climatique et leurs conséquences économiques et sociales⁴⁵. De même, d'importants programmes de recherche visent à améliorer la qualité des projections régionales du climat, à l'image du projet de recherche européen PRUDENCE, par exemple, qui vise à produire, en collaboration avec les équipes d'impacts, des scénarios climatiques à petite échelle sur l'Europe avec un soin particulier pour l'analyse des événements extrêmes. Enfin, pour rendre comparables leurs résultats et les mettre en perspective dans un tableau régional et sectoriel des impacts, un effort d'homogénéisation des hypothèses socio-économiques a été accompli, en retenant comme base commune les scénarios prospectifs du GIEC (les scénarios SRES, [Nakicenovic, 2000]).

Cependant, pour le moment, l'essentiel des résultats disponibles ont été obtenus à partir de scénarios climatiques et socio-économiques difficilement comparables. Seuls les travaux de William Nordhaus, Richard Tol et Robert Mendelsohn, que nous avons présentés, ont tenté de produire une vision globale et cohérente des impacts par région et par secteur. Malheureusement, cette tentative d'intégration s'est opérée au prix de simplifications et d'hypothèses multiples et surtout ces trois études ne sont pas comparables entre elles puisqu'elles diffèrent sur le plan des scénarios climatiques et économiques, des hypothèses sur l'adaptation, du cadrage régional et des secteurs retenus.

C. Les difficultés de la valorisation monétaire

A côté des incertitudes dans la connaissance des impacts éprouvés le long d'un scénario de changement climatique (que nous avons discutées aux points précédents), de nombreuses incertitudes demeurent pour tout ce qui touche à la valorisation de ces impacts en dommages, c'est à dire comment évaluer à partir d'un ensemble de mesures (encore très imprécises) des impacts du changement climatique leurs répercussions sur le bien-être des populations.

Très tôt, ce point a été au cœur des critiques formulées à l'encontre des premières estimations des dommages publiées [Ayles et Walter, 1991; Fisher et Hahnemann, 1993; Grubb, 1993] mais bien vite l'essentiel des discussions s'est focalisé sur des aspects plus techniques (description des impacts et incertitudes associées) en s'écartant de cet enjeu pourtant essentiel. Certes, sans vision d'ensemble précise des impacts, point d'estimation robuste des dommages. Cependant, dans l'hypothèse optimiste où nous pourrions disposer d'une quantification assez fine des impacts du changement climatique selon un jeu d'indicateurs pertinents (et les travaux de Nicholls sur les conséquences socio-économiques de la hausse du niveau des mers [Nicholls et al., 1999] ou le rapport de l'IIASA sur changement climatique et sécurité alimentaire [Fischer et al., 2002], par exemple, marquent un pas dans cette direction), la question de l'évaluation des conséquences ultimes de ces modifications de l'environnement sur le bien-être reste toujours en

⁴⁵ A ce titre, se reporter à la récente revue des études d'impacts à l'échelle mondiale, secteur par secteur, de l'OCDE [Smith et Hitz, 2002] ou aux études régionales du programme américain NACC.

suspens. Ainsi, comment valoriser les pertes d'aménités et de confort consécutives à un réchauffement du climat ? comment tenir compte des pertes écologiques ? comment traduire convenablement enfin l'ensemble des coûts supportés par les populations dont l'approvisionnement en eau ou la sécurité alimentaire seraient menacés ou les coûts induits par les migrations d'éventuels *climate change refugees* ?

En fait, nous ne disposons pour le moment que d'une première approximation des dommages, qui repose d'une part, sur un tableau lacunaire des impacts directs du changement climatique (c'est-à-dire qui ne prend pas en compte les mécanismes de propagation de ces impacts au sein des relations entre économie, environnement et société) et d'autre part, sur des mesures très imparfaites des pertes et gains en bien-être (exprimés en pourcentage du PIB). En laissant de côté la question de la qualité de la description des impacts dans ces études, la question de leur évaluation en dommages pose trois grandes catégories de problèmes.

a) Le premier concerne *la valorisation de tous les impacts qui ne sont pas directement en prise avec les activités productives* et pour lesquels il est donc difficile d'obtenir une première mesure exprimée en termes monétaires : ce sont par exemple, les pertes d'aménités et le degré de confort, les risques sanitaires, les pertes écologiques.

En principe, la valorisation de ces dernières, par exemple, ne devrait pas poser problème car un vaste champ de l'économie de l'environnement est consacré au développement et à l'application de méthodes d'évaluation des actifs environnementaux : évaluation directe à partir des prix du marché, appel aux marchés de substitution (coûts de remplacement, dépenses de protection, coûts de transport, prix hédonistes), appel aux marchés hypothétiques (évaluation contingente).

Dans la pratique cependant, leur application au cas du changement climatique ne laisse pas de soulever un certain nombre de difficultés. Dans beaucoup de régions d'abord, les données manquent pour appliquer l'une ou l'autre de ces méthodes⁴⁶. De plus, quand des travaux sont disponibles, ils correspondent bien souvent à des évaluations pour un écosystème donné à un emplacement donné (par exemple, création d'une réserve de biosphère au Costa Rica ou préservation d'une zone humide face à un projet d'aménagement). Ces situations ne sont pas comparables aux risques que fait peser le changement climatique sur les écosystèmes qui sont d'une tout autre échelle: ce sont potentiellement des migrations d'écosystèmes (que l'on commence déjà à observer) voire leur disparition irréversible. En fait, devant les incertitudes sur l'importance des services rendus par les écosystèmes et la manière dont ils sont menacés par le changement climatique, en raison aussi de notre faible prise de conscience de tels enjeux, il est douteux, comme l'écrit H. Jacoby [Jacoby, 2002], qu'une procédure d'évaluation contingente menée par exemple avec une question comme « Quel est votre consentement à payer pour préserver de la disparition toute la toundra de l'hémisphère nord ? » donne jamais un résultat opérationnel sur les préférences à l'égard de l'environnement dans la perspective d'éclairer la décision publique.

De même, quelle réponse pouvons-nous donner à la question : « Combien coûte un réfugié ? ». [Ayes et Walter, 1991] apportent des éléments de réponse en partant de la perte de production annuelle par tête mais leur analyse reste de toute manière limitée par les effets d'échelle (ce n'est pas une personne qui émigre mais sous l'effet du changement climatique,

⁴⁶ Sans parler du fait que nous savons pas comment évolueront les préférences de nos descendants vis à vis de l'environnement.

potentiellement, toute une région qui cherche asile chez ses voisines et l'accueil de flots de réfugiés ne se fait pas sans problèmes) et par l'impossibilité d'évaluer les coûts psychologiques pour ceux qui doivent quitter leur maison et leur terre.

b) Le deuxième problème a trait aux *difficultés de la valorisation des impacts en dommages dans un mode où ils sont très inégalement répartis*, majoritairement supportés par les régions en développement. Comment comparer et agréger les évaluations monétaires des dommages quand elles portent d'un côté sur la situation de sociétés riches et industrialisées et de l'autre, sur la situation de nations dont la plupart des individus s'efforcent simplement de survivre au quotidien ?

Cette question touche aux arguments d'équité intra-générationnelle - dont nous réservons l'examen à la dernière partie de ce chapitre, comme sources de controverses dans l'édification des politiques climatiques - mais avant même de discuter des modalités d'agrégation des estimations régionales des dommages, il est important de souligner les difficultés de produire une mesure commune entre les régions des dommages du changement climatique. En effet, à supposer que les chiffres du Tableau I-3 en soient effectivement des estimations convenables, ces évaluations monétaires ne sont pas directement comparables entre elles.

Prenons, comme [Ayles et Walter, 1991], l'exemple des conséquences socio-économiques de la hausse du niveau des mers. Le prix de la terre peut être utilisé comme indicateur pour tenter d'évaluer le coût des surfaces inondées. Compte tenu des différences de niveau de vie et de taux de change, on arrive par exemple aux valeurs suivantes : 3 000 *US\$.ha⁻¹* au Bangladesh et 30 000 *US\$.ha⁻¹* aux Pays-Bas. Il est dès lors possible d'évaluer le coût des terres abandonnées devant la hausse du niveau des mers dans chaque région. Cependant, même si elles sont libellées toutes les deux en dollars, ces deux évaluations, qui sont correctes à l'intérieur de chaque pays, ne sont pas comparables car l'utilité marginale d'un dollar n'est pas la même dans les deux zones. Les comparer reviendrait en effet à supposer qu'un hectare de terre contribue 10 fois plus au bien-être des populations aux Pays-Bas qu'au Bangladesh. Compte tenu des taux de change, les pertes économiques (infrastructures et activités économiques localisées sur ces terres) sont considérées comme de plus grande valeur aux Pays-Bas qu'au Bangladesh (et il est clair que la reconstruction d'une digue ou d'une maison dans le premier pays coûte plus cher que dans le second du point de vue d'un fonds d'aide aux réfugiés dont les ressources sont par exemple libellées en dollars) néanmoins le taux de change ne prend pas en compte le très lourd coût en bien-être supporté par les populations bangladaises qui tirent leur subsistance quotidienne des activités agricoles⁴⁷ alors même que la hausse du niveau des mers les met en péril de manière irréversible. Dans la perspective d'une indemnisation, d'une compensation ou d'une(impossible) réparation, une telle approche sous-estimerait donc le montant des transferts financiers puisqu'elle masque les très grandes disparités des dommages. En pratique, ce sont donc les utilités des différents régions qui doivent être comparées (et non directement les évaluations monétaires des impacts).

c) Enfin, le troisième problème de l'évaluation des dommages a trait à *la manière dont est valorisé le risque* ou précisément dont il ne l'est pas. En effet, les estimations disponibles ne prennent pas en compte l'incertitude sur l'étendue des impacts et en conséquence, dans la

⁴⁷ Rappelons que la densité de population au Bangladesh s'élève à 975 hb.km² (Pays-Bas : 384 hb.km²), que la population tirant sa subsistance des activités agricoles représente 55% de la population totale (Pays-Bas : 3,3%) et qu'enfin la part des activités agricoles dans le PIB atteint 23,3 % (Pays-Bas moins de 3%). Source : année 2000 [FAO, 2002; World Bank, 2002b].

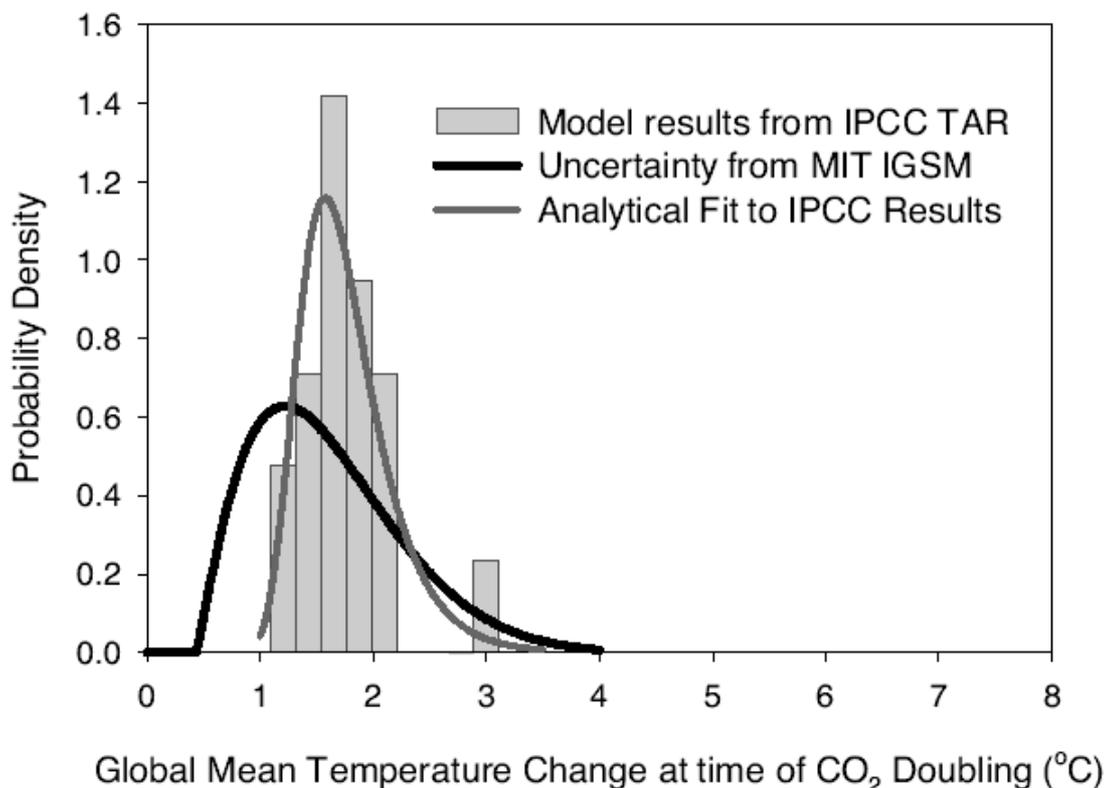
valorisation des impacts en dommages, les éléments spécifiquement liés au risque n'apparaissent pas. On doit pourtant tenir compte ici du fait que l'attitude face au risque va dépendre de l'ampleur de certaines réalisations défavorables (jusqu'à quel point le revenu est menacé) - et ce même si leur éventualité semble très faible - et de l'information que l'on possède pour le qualifier (distribution de probabilités objectives, incertitude sur l'occurrence d'un certain nombre de situations toutes connues, ambiguïté complète). Ce point est particulièrement prégnant dans l'éventualité où certains de ces impacts pourraient remettre en cause la subsistance des populations dans les pays en développement (parce que la mise en œuvre de l'adaptation y est compromise, parce qu'il n'existe pas de mécanismes d'assurance dans ces régions, parce que même l'appel à l'assistance internationale ne permet pas de réparation) : il est vraisemblable que ces groupes valoriseront de tels risques de manière beaucoup plus importante que l'impact attendu en moyenne qui lui n'est pas systématiquement dangereux. Comme l'écrit Roger Guesnerie : « L'absence de mécanisme d'assurance accroît les coûts sociaux à prendre en compte dans le calcul économique » ([Guesnerie, 2003], p. 33). Ceci suggère que les dommages sont vraisemblablement sous estimés - au moins pour les régions en développement - dans les études disponibles.

D. Evaluation de l'incertitude

Enfin dans cette rubrique consacrée à l'incertitude sur les dommages, un dernier point est légitimement consacré à la quantification et au traitement de l'incertitude elle-même. Seuls Richard Tol et Robert Mendelsohn ont tenté d'évaluer les incertitudes sur leurs résultats mais compte tenu de nombreux *caveats*, il faut davantage voir ces estimations comme des évaluations subjectives reposant sur leurs dires d'experts. Richard Tol d'ailleurs estime plutôt qu'il a évalué une borne inférieure de l'incertitude en présence.

Comme le rappelle Fankhauser [Fankhauser, 1994], ces estimations se sont concentrées sur les valeurs les plus probables de chacun des paramètres importants (émissions, cycle du carbone, ...) et n'ont pas exploré ce que l'on pourrait attendre d'autres configurations (pour une illustration, voir Figure I-5). Devant les difficultés pour quantifier l'incertitude (en effet il faudrait pouvoir évaluer l'incertitude sur chacun des déterminants des dommages et comment elle s'amplifie quand elle se propage au long de la chaîne qui conduit des émissions de GES aux dommages), une approche par scénario permettrait cependant de réunir quelques informations sur les grands risques du changement climatique (ralentissement ou interruption de la circulation thermohaline dans l'Atlantique Nord, fonte des calottes polaires, sécheresses continentales, etc.) ou l'étendue des dommages pour des niveaux de réchauffement relativement élevé. Or pour le moment, il n'existe aucun scénario « catastrophe » ni aucune estimation pour des réchauffements supérieurs à +3°C, qui seraient pourtant nécessaires pour une meilleure compréhension des risques induits par le changement climatique.

Figure I-5. Incertitudes sur le réchauffement au moment du doublement de la concentration atmosphérique de CO₂



Distribution de probabilité pour l'élévation de la température moyenne globale au moment du doublement de la concentration atmosphérique de CO₂ (avec une augmentation annuelle de 1% de la concentration).

Ce sont les conditions climatiques sous lesquelles ont été effectuées les évaluations de dommages ; dans l'ensemble, elles ont donc exploré une gamme de réchauffements comprise entre la valeur modale et la médiane mais pas au-delà. Source : [Webster et al., 2002] (une des premières études à tenter de quantifier les incertitudes économiques et climatiques et d'examiner leurs liens avec les politiques climatiques).

En définitive, notre connaissance des impacts du changement climatique comme des dommages reste à ce jour très limitée : nous disposons en effet d'une information parcellaire et encore très incertaine. Sous le nom d'évaluation des dommages ou des impacts socio-économiques du changement climatique, nous avons en fait un chiffrage approximatif des impacts supportés dans quelques décennies par les activités économiques dans les régions développées pour un climat déplacé vers un nouvel équilibre. C'est donc avec prudence qu'il faut accueillir les résultats de ces travaux car beaucoup d'aspects essentiels des risques climatiques ne sont pas pris en compte : ils donnent l'idée d'un changement climatique relativement maîtrisable (au moins dans les pays développés) mais occultent, entre autres, la question des risques de long-terme ou du déclenchement de crises graves dans les régions en développement. Bien plus, aucune de ces études, du fait qu'il s'agit d'estimations ponctuelles, ne permet de décrire comment évoluent les dommages pour différentes trajectoires de changement climatique, par exemple quels sont les gains à attendre quand on passe d'une cible

de long-terme relativement lâche (650 ppm et au-delà) à une cible beaucoup plus contraignante (500 ppm et en deçà)⁴⁸ ?

Partant, c'est sur la base d'une information extrêmement fragile et lacunaire qu'ont été renseignés les modèles intégrés d'évaluation des politiques climatiques - un unique point, issu des estimations dont nous venons de discuter en long les limites - et dès lors, on peut légitimement s'interroger sur la qualité de la représentation des risques climatiques au sein de ces modèles et sur le degré de confiance à accorder à leurs recommandations. En particulier, une question-clé à laquelle les estimations des dommages n'apportent pas de réponse concerne la forme des fonctions de dommages (qui relie intensité du changement climatique et niveau de dommages), enjeu pourtant déterminant dans les analyses coût-bénéfice des politiques climatiques car la courbure de la fonction caractérise comment évoluent les dommages dès lors qu'on s'écarte de l'unique point de calibrage. Nous reviendrons en détail au chapitre VI de cette thèse sur les difficultés de l'extrapolation d'une telle fonction, notamment en étudiant dans quelle mesure les hypothèses adoptées par les modélisateurs pour pallier l'absence d'informations robustes sur les risques climatiques contribuent à orienter les résultats des modèles intégrés. Pour le moment, nous pouvons conclure avec le jugement que portent les derniers auteurs du GIEC sur la qualité de la représentation des risques climatiques au moyen des fonctions de dommages : *“Aggregate damage functions used in integrated assessments are mostly illustrative. They should be regarded as placeholders that will be replaced by more accurate functional forms as our knowledge of impacts dynamics improves”* ([McCarthy et al., 2001], Chap. XIX, § 19.5.4.1).

On est donc renvoyé à un ambitieux travail d'investigation pour être en mesure de nourrir un modèle intégré du changement climatique comme celui présenté à l'Encadré I-1. En particulier, il faudra avancer dans la connaissance des impacts, préalable à toute évaluation des dommages, et dans la connaissance des déterminants du bien-être des populations exposées au risque climatique. C'est là un vaste agenda de recherche. Si les objectifs en sont clairement identifiés par la communauté scientifique, une question-clé cependant n'a pas encore de réponse : quand pourrons-nous disposer d'éléments suffisamment robustes sur les dommages pour éclairer la décision collective ? Dans l'attente, quelle mesure des bénéfices des politiques climatiques peut servir de base à la négociation climat ?

⁴⁸ A ce titre, [Watson et the Core Writing Team, 2001] rappellent que : *“Comprehensive, quantitative estimates of the benefits of stabilisation at various levels of atmospheric concentrations of greenhouse gases do not yet exist”*.

III. Les difficultés que posent le choix d'une mesure des bénéfiques des politiques climatiques

L'élaboration des politiques climatiques et la question de leur acceptabilité par les différentes parties rend effectivement nécessaire la référence à une mesure commune et non controversée des bénéfiques à attendre de tel ou tel portefeuille d'actions destinées à lutter contre le changement climatique. C'est assez naturellement en faveur d'une mesure monétaire de ces bénéfiques que l'on pourrait opter sachant que les coûts de réduction des émissions comme le montant des investissements d'adaptation sont exprimés en unités monétaires et que l'analyse coût-bénéfice constitue un cadre d'analyse des politiques et d'aide à la décision approprié pour intégrer ces informations.

Nous avons cependant commencé à rencontrer à la section précédente des éléments qui montrent que les évaluations des dommages dont nous disposons pour le moment sont encore trop fragiles pour étayer tout calcul de type coût-bénéfice ; dans cette section, nous continuons l'énoncé des *caveats* en mettant cette fois l'accent sur les controverses qui peuvent prendre source autour des questions de valorisation des impacts en dommages et de recours à l'analyse coût-bénéfice.

III.1. La nécessité d'une métrique commune des bénéfiques des politiques climatiques

Toute la première partie de ce chapitre est riche d'exemples qui montrent que la science des impacts commence timidement à donner un aperçu des conséquences de certains scénarios de changement climatique. En l'état cependant, de telles informations sont difficilement exploitables pour éclairer le processus d'élaboration des politiques climatiques : il s'agit en effet d'une masse d'éléments très hétérogènes exprimés dans des unités très diverses (variations des rendements agricoles, hausse du niveau des mers et superficies inondées, sur-coûts pour le secteur de l'assurance, risques sur la sécurité alimentaire ou l'approvisionnement en eau de certaines populations), éléments qui n'ont pas de mesure commune, ni entre eux, ni avec les coûts de l'action.

Pourtant, il est nécessaire de disposer d'une mesure commune des bénéfiques des politiques climatiques pour améliorer la comparabilité entre coûts de l'action et dommages résiduels, et ce au moins pour quatre raisons :

- Planifier les politiques d'adaptation. Par exemple, devant les conséquences de la hausse du niveau des mers, aider aux arbitrages entre abandon des terres et renforcement des protections. Ceci concerne autant les infrastructures et les implantations humaines que les écosystèmes menacés des zones côtières (marais maritimes, mangroves) ;
- Replacer les politiques climatiques dans la perspective plus large des politiques de développement. En particulier, pour les régions où les risques climatiques semblent participer à l'aggravation d'une situation déjà défavorable, informer les décideurs sur les opportunités relatives des politiques de développement, des politiques

d'adaptation et des politiques de réduction des émissions (par exemple pour la gestion de l'eau ou les politiques de santé publique);

- Obtenir des informations sur les gains de telle ou telle politique et aider à choisir les cibles de long-terme des politiques climatiques. Par exemple, comment évoluent les bénéfices selon que l'on retient une cible de stabilisation des concentrations à 450, 550 ou 650 ppm et compte tenu des coûts de chacune de ces options, où se situe le gain maximal ;
- Donner un éclairage sur la répartition des efforts entre les parties et sur les mécanismes de transferts et de solidarité entre régions, sachant que les impacts sont très inégalement répartis à l'échelle du globe. Par exemple, les aides versées par une Europe du Nord, semble-t-il relativement épargnée, à une Europe du Sud, où les ressources en eau seraient menacées.

Dans cette liste, on peut remarquer la multiplicité des niveaux de décision, de l'agent économique (l'agriculteur ou l'entreprise qui décident de s'adapter) jusqu'aux Etats ou aux groupements d'Etats, et soulèvent les questions de coordination et de négociation entre ces différentes entités. A ce titre, la mesure des bénéfices des politiques climatiques se doit également d'être commune, c'est à dire d'être partagée entre les différentes parties prenantes. Dans la perspective d'une négociation, il est en effet nécessaire que l'information scientifique (climat, économie, technologie, etc.) sur laquelle repose en partie tout accord soit comprise par tous et ne prête pas aux controverses.

C'est donc à double titre que nous avons besoin d'une mesure commune des bénéfices des politiques climatiques : d'une part, pour rassembler les informations sur l'étendue des conséquences du changement climatique et améliorer la comparabilité avec les coûts de l'action et d'autre part, pour faciliter le processus de négociation entre différentes parties et entre différents niveaux de décision.

III.2. Or pour le moment ces bénéfices sont incommensurables

Les évaluations des dommages que nous avons discutées dans la deuxième partie sont une première tentative d'exprimer selon une métrique commune, monétaire, les conséquences socio-économiques de certains scénarios de changement climatique. Nous avons commencé d'en présenter les limites pour conclure qu'en l'état ces chiffres comme les recommandations en termes de politiques climatiques qui en découlent doivent être accueillis avec précaution. En fait, les bénéfices des politiques climatiques sont pour le moment incommensurables, selon le mot de Henry Jacoby [Jacoby, 2002]. C'est bien dans les deux acceptions qu'il faut entendre ce terme : non pas que les bénéfices soient infinis mais parce que nous ne disposons toujours pas d'une mesure monétaire relativement fiable (mesure commune à toutes les catégories de dommages et aux coûts de l'action) et non controversée (mesure commune à tous les niveaux de décision). Nous avons déjà examiné le premier point à la section précédente, nous nous concentrons maintenant sur le second.

Si les évaluations des dommages disponibles sont indéniablement fragiles, elles sont aussi très controversées. Ces controverses prennent corps à la fois sur les chiffres à la base des

estimations, en raison de l'incertitude, et sur les principes mêmes de la valorisation des bénéfices.

III.2.1. L'incertitude au cœur des controverses

Effectivement, un premier type de controverses est nourri des croyances sur les dommages qui prennent naissance compte tenu des incertitudes en cascades que l'on rencontre quand on cherche à les évaluer. Croyances sur la dynamique du climat, croyances sur le déploiement des impacts, croyances sur les mécanismes d'adaptation (capacités techniques et réelle efficacité - développement de nouveaux cultivars, politiques de gestion de l'eau, ... - , capacités effectives de mise en œuvre - quels financements dans les pays en développement ? -, nature des anticipations des gouvernements, des marchés et des agents). Ces divergences d'opinion, selon que l'on est optimiste ou pessimiste, se retrouvent dans les estimations très contrastées des impacts et des dommages, à l'échelle des pays et des secteurs (*cf* par exemple la situation de la Chine au Tableau I-3).

L'absence de tableau clair sur l'étendue des dommages (à part peut-être que les pays en développement sont spécialement vulnérables) pose évidemment un problème dans le cadre d'une négociation où il est nécessaire que les décisions reposent sur un minimum d'informations robustes. Or chaque partie peut exhiber une distribution des dommages qui sert plutôt ses intérêts. Dès lors le risque est grand de voir s'enfermer le processus de négociation dans des controverses sans fin engendrées par les incertitudes persistantes sur la répartition des gagnants et des perdants. Cependant, on peut espérer que des progrès des connaissances scientifiques - nous discuterons ce point au chapitre III - permettent finalement l'émergence d'un relatif consensus. Dans cette perspective, toute la question est de savoir si les incertitudes seront réduites à un rythme suffisamment rapide compte tenu des inerties des mécanismes naturels et sociaux-économiques et des risques de dommages majeurs et irréversibles.

III.2.2. Croyances, positions éthiques et controverses

A côté de ce premier type de controverses, il existe des controverses beaucoup plus irréductibles qui sont liées aux principes de valorisation mêmes. On en a un exemple avec les controverses vives qui ont suivi la publication du second rapport du GIEC, controverses qui ont cristallisé en particulier autour des questions de valorisation des risques pour la santé humaine (morbidité, mortalité) induits par le changement climatique (au chapitre VI du rapport du troisième groupe de travail, [Bruce *et al.*, 1996])⁴⁹. En suivant des méthodes classiques en économie (essentiellement approche du capital humain), les différents auteurs établissent une corrélation positive entre niveau de revenu et valeur statistique de la vie humaine : autrement dit, le mort d'un cyclone au Bangladesh vaut moins que le mort d'un cyclone en Floride. Résultat qui en a choqué plus d'un, soit à l'idée même d'attribuer une valeur à la vie humaine, soit à l'idée qu'un même impact du changement climatique n'ait pas la même valeur selon l'endroit où il se produit.

⁴⁹ Cette crise a même failli aboutir au retrait pur et simple du chapitre VI au rapport (pour un historique voir [Hourcade, 1996]). Le chapitre est finalement maintenu mais comporte plusieurs caveats pour distinguer valeur économique et position éthique, notamment plusieurs encadrés sur l'évaluation de la vie humaine, les questions d'agrégation des dommages et de comparaisons entre PVD et pays industrialisés.

Cette crise au sein du Bureau du GIEC révèle plusieurs attitudes vis à vis de la valorisation des impacts en dommages, c'est à dire au moment où les principes de théorie économique rencontrent jugements de valeurs et positions éthiques.

Une première attitude refuse purement et simplement la valorisation, pour des impératifs moraux (on peut penser au concert de protestations qui ont suivi la publication des résultats de [Costanza *et al.*, 1997] et à l'exemple du GIEC précédemment cité) ou dans une perspective moins catégorique, entretient une suspicion soutenue à l'égard des méthodes employées (comment l'analyse coût-bénéfice traite des dommages irréversibles ou des problèmes de compensation entre groupes) et des résultats produits. Mais c'est dans ce cas refuser tout recours à un calcul coût-bénéfice et la nécessité de fonder la négociation et l'analyse des politiques climatiques sur d'autres types d'indicateurs des risques et de les intégrer dans les cadres d'analyse de la décision appropriés.

Une seconde attitude quant à elle accepte la valorisation mais bute sur les enjeux distributifs et les considérations d'équité. Si la valeur de la vie humaine est convenablement évaluée dans chaque région (en particulier, pour éviter de sous/sur évaluer le coût d'une vie humaine menacée par le changement climatique par rapport au coût d'une vie humaine menacée par le SIDA ou la malaria), se pose en effet la question de la comparaison entre régions et de l'agrégation des évaluations régionales (voir Encadré I-3).

Nous avons commencé à l'aborder à la section précédente en indiquant que ce ne sont pas directement les évaluations monétaires des dommages dans chaque région qui doivent être comparées mais, pour refléter effectivement la répartition très inégale des impacts du changement climatique et de leurs conséquences sur le bien-être, les utilités des différentes populations exposées. Au début de ce chapitre, nous avons vu que les différents jeux de pondérations qui peuvent être utilisés pour agréger les fonctions d'utilité régionales reflètent différentes conceptions de l'équité intra-générationnelle mais qu'aucune d'entre elles n'est plus légitime du point de vue de la théorie économique qu'une autre. Si l'on admet que ces questions ressortent de la sphère politique et diplomatique⁵⁰, il reste néanmoins à s'assurer que les évaluations des dommages et les calculs économiques entrepris s'ils reflètent certaines visions de l'équité ne manquent pas de cohérence économique. A ce titre, [Fankhauser *et al.*, 1997] et [Azar, 1999] montrent qu'une position qui consiste à attribuer à la valeur de la vie humaine une valeur uniforme quelle que soit la région⁵¹ - tentative de concilier de manière simpliste valorisation des impacts et équité - n'est bien souvent pas compatible avec des impératifs de rigueur économique (caractéristiques des préférences des individus et modes d'agrégation).

Surtout, il faut bien voir que toute somme des pertes et gains du changement climatique n'est légitime que si on fait l'hypothèse d'une compensation entre régions bénéficiaires et régions vulnérables (principe de Hicks-Kaldor). En repartant des résultats de [Mendelsohn *et al.*, 1997] par exemple (voir Figure I-6), on aboutit - en suivant une règle « *Un dollar, une voix* » - à un dommage équivalent mondial de l'ordre de 0,3% du revenu mondial, chiffre bien sûr très faible qui milite pour l'inaction. Or ce chiffre provient de l'agrégation de dommages très inégalement

⁵⁰ C'est d'ailleurs la position des auteurs du troisième rapport du GIEC qui séparent la question de l'évaluation des impacts de la question de la valorisation des dommages et de la décision de ce qui constitue un changement climatique dangereux.

⁵¹ En retenant d'ailleurs, en référence au Principe pollueur-payeur, la valeur calculée pour les pays industrialisés, historiquement responsables de l'essentiel des émissions de GES.

répartis: les pertes sont supportées essentiellement par les pays en développement (jusqu'à 4,7% du PIB pour l'Afrique) et c'est l'agrégation avec les gains dans les pays de l'OCDE (qui enregistrent des gains de l'ordre de 0,1% de leur revenu) qui permet de déboucher sur un chiffre aussi faible. En pratique on doit s'interroger sur la crédibilité de tels mécanismes de compensation *ex post* ou de prévention *ex ante*. Dans notre exemple numérique, les flux financiers Nord-Sud nécessaires représenteraient un montant comparable à celui de l'aide publique au développement du Comité d'aide au développement de l'OCDE⁵² - soit en 2000, 53,7 milliards de dollars [OCDE, 2001]; déjà peu envisageables en l'état, de tels transferts deviendraient vite irréalistes en cas de dommages supérieurs.

Une évaluation réaliste des dommages requiert donc d'examiner ce qui se passe en cas de non-compensation. On doit ici prendre en compte deux mécanismes : a) d'une part, la mise en cause de besoins fondamentaux des populations en l'absence d'aide internationale pour financer et mettre en place des stratégies d'adaptation ou parce que la réparation est tout simplement impossible ; b) d'autre part, l'existence d'une aversion au risque très grande pour ces populations (voir II.2.4. C.) parce qu'elles n'ont pas les moyens économiques de s'assurer, parce que l'assurance est inexistante ou inopérante pour de tels risques. A ce titre, [Ambrosi *et al.*, 2002] montrent que la réévaluation la plus importante vient de la prise en compte des implications des dommages sur les populations les plus vulnérables en cas de non-compensation ou d'absence d'aide à l'adaptation.

Dès lors il est manifeste que nous sommes loin de disposer aujourd'hui au travers des estimations des dommages d'une mesure relativement robuste et non controversée des bénéfices des politiques climatiques. Pourtant, compte tenu de la nature des risques que fait peser le changement climatique et des très grandes inerties propres aux systèmes naturels, on ne peut attendre pour décider de l'attitude à adopter - éventuellement l'inaction - que la question des dommages trouve une réponse satisfaisante au terme d'une expérience de plein champ, qui apporterait des éléments sur la réactivité du climat, l'étendue avec laquelle les écosystèmes sont vulnérables, comment les sociétés peuvent espérer faire face au changement climatique, *etc.* C'est pourquoi la discussion sur l'application du principe de précaution en ce domaine se fait à partir d'indicateurs qui sont autant d'approximations successives d'une fonction de dommages encore inconnue et que nous allons maintenant explorer.

⁵² Principale instance de l'OCDE en charge du développement durable. Fin 2001, le Comité comptait 22 pays membres, c'est à dire tous les pays membres de l'organisation à l'exception de la Corée, de la Hongrie, de l'Islande, du Mexique, de la Pologne, de la République slovaque, de la République tchèque et de la Turquie.

Encadré I-3. Agréger les estimations régionales des dommages : l'équité en perspective

Les impacts du changement climatique seront très inégalement répartis à la surface du globe, majoritairement supportés par les pays les moins développés (Figure I-6). Dans un tel contexte, comment comparer et agréger les évaluations régionales des dommages du changement climatique quand du fait de la distribution très hétérogène du revenu par tête entre pays, un même impact (mise en péril d'une vie humaine, destruction d'habitations, etc.) se trouve peser beaucoup moins lourd s'il se produit dans une région peu développée. A des fins d'équité, pour corriger les grandes divergences qui peuvent ainsi apparaître, on peut introduire des pondérations quand on agrège les utilités des pays riches et des pays pauvres. Cette question de la comparaison des conséquences socio-économiques des impacts du changement climatique en environnement hétérogène (revenu par tête très contrasté et vulnérabilité au changement climatique très diverse) se complique de considérations d'ordre éthique, compte tenu des différences de responsabilité dans les volumes historiques et futurs de GES émis : quand un pays riche expose un pays pauvre à un risque, quelle échelle de valeur doit être utilisée pour en mesurer les conséquences ? Doit-on les évaluer selon les standards du pays pauvre (victime), ou du pays riche (responsable) ?

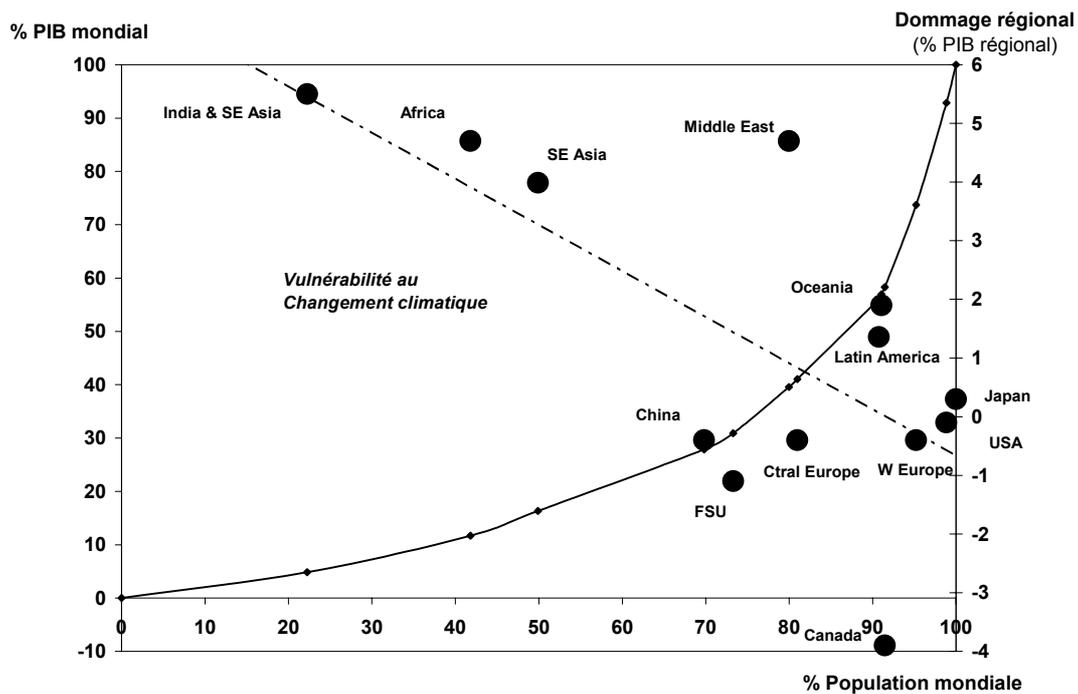


Figure I-6. Inégale répartition du revenu mondial, inégale vulnérabilité au changement climatique

On se propose d'examiner ces questions dans le cadre suivant. Nous considérons une situation avec R régions. n_r désigne la population de la région r et C_r le revenu de référence de la région r . Les variables à l'échelle mondiale sont : $N = \sum_r n_r$, la population totale et $C = \sum_r C_r$, le revenu mondial de référence. Soit $u(.)$, la fonction d'utilité de l'agent représentatif de chaque

région. Nous faisons l'hypothèse simplificatrice que la fonction d'utilité dépend uniquement du revenu *per capita*. $u(.)$ vérifie les deux hypothèses standards suivantes : $u'(x) > 0$ et $u''(x) < 0$. Nous supposons que chaque région est homogène : le revenu y est réparti de manière uniforme, les impacts sont ressentis pareillement sur toute l'étendue du territoire de la région.

Soit θ_r , l'impact induit par le changement climatique pour la région r , exprimé en pourcentage du revenu de référence C_r . Il s'agit d'une grandeur algébrique : $\theta_r > 0$ traduit des gains de productivité et $\theta_r < 0$, à l'inverse, une dégradation de la productivité. L'impact du changement climatique pour la région r se traduit donc par une variation (positive ou négative) du revenu régional valant $C_r \theta_r$; en conséquence, le revenu régional "après changement climatique" vaut $C_r (1+\theta_r)$. Dans le cadre de ce modèle, on a *impact régional = dommage régional* car les pertes de productivité se répercutent complètement sur le niveau de consommation, seul déterminant du bien-être. L'impact direct du changement climatique sur les activités productives, exprimé en valeur monétaire selon les valeurs de la région, est donc une mesure correcte du dommage subi par cette région. Toute la question est bien sûr de comparer ces estimations régionales.

Nous pratiquons une agrégation entre les régions en affectant un poids α_r à chacune. Le bien être total, W , est ainsi la somme de l'utilité de chaque agent représentatif multipliée par la taille de la population de la région qu'il représente et pondérée par un coefficient α_r . Les agents diffèrent donc uniquement par leur dotation initiale et la manière dont ils sont affectés par le changement climatique.

$$W = \sum_r \alpha_r n_r u \left(\frac{C_r}{n_r} \right).$$

Munis de ces notations, nous pouvons évaluer ΔW , la variation de bien-être à l'échelle globale induite par les impacts régionaux du changement climatique :

$$\begin{aligned} \Delta W &= \sum_r \alpha_r n_r u \left(\frac{C_r (1+\theta_r)}{n_r} \right) - \sum_r \alpha_r n_r u \left(\frac{C_r}{n_r} \right) \\ &= \sum_r \alpha_r n_r \left[u \left(\frac{C_r (1+\theta_r)}{n_r} \right) - u \left(\frac{C_r}{n_r} \right) \right]. \end{aligned}$$

Pour valoriser ce dommage en équivalent monétaire en l'exprimant en pourcentage du revenu mondial, nous faisons à l'échelle globale l'hypothèse d'homogénéité que nous avons introduite pour chacune des régions. A nouveau, nous faisons appel à un agent représentatif et dès lors, W s'exprime comme : $W = Nu(C/N)$.

Notons Θ , le dommage résultant à l'échelle mondiale valorisé en termes monétaires en pourcentage du revenu mondial de référence, C . L'impact du changement climatique se traduit donc par une variation du bien être à l'échelle globale :

$$\Delta W = Nu \left(\frac{C(1+\Theta)}{N} \right) - Nu \left(\frac{C}{N} \right) = N \left[u \left(\frac{C(1+\Theta)}{N} \right) - u \left(\frac{C}{N} \right) \right].$$

Par nature, les deux expressions définissant ΔW sont égales. Il vient après un développement limité de Taylor à l'ordre 1 :

$$\Theta = \sum_r \alpha_r \theta_r \frac{C_r}{C} \frac{u'\left(\frac{C_r}{n_r}\right)}{u'\left(\frac{C}{N}\right)}$$

Nous avons examiné deux jeux de pondération des utilités régionales $\{\alpha_r\}_{1 \leq r \leq n}$, reflétant des considérations d'équité très contrastées. Dans un cas, nous donnons un poids équivalent à chaque individu - règle que nous baptisons "Un homme, un vote": c'est à dire $\forall r, \alpha_r = 1$.

Dans le second cas, les $\{\alpha_r\}_{1 \leq r \leq n}$ sont choisis conformément au principe "Les politiques climatiques ne sont pas des politiques de redistribution du revenu" - et nous baptisons cette règle « Un dollar, un vote »: c'est à dire que les pondérations sont choisies de telle sorte que la distribution observée du revenu soit considérée comme socialement optimale. On retrouve des poids de Negishi, qui donnent d'autant plus d'importance à un groupe que son niveau de revenu est élevé. A une constante (positive) multiplicative près, on

trouve : $\forall r, \alpha_r = u'\left(\frac{C}{N}\right) / u'\left(\frac{C_r}{n_r}\right)$.

Le dommage résultant à l'échelle mondiale, exprimé en équivalent monétaire comme pourcentage du revenu mondial, devient selon la règle observée :

"Un homme, un vote"

"Un dollar, un vote"

$$\Theta = \sum_r \theta_r \frac{C_r}{C} \frac{u'\left(\frac{C_r}{n_r}\right)}{u'\left(\frac{C}{N}\right)}$$

$$\Theta = \sum_r \theta_r \frac{C_r}{C}$$

Quelle est l'influence du choix de la règle d'équité sur le dommage résultant à l'échelle mondiale ? Si on adopte la règle "Un dollar, un vote", alors le dommage résultant mondial s'écrit comme la simple somme des pertes et gains régionaux. Les gains compensent les pertes à un taux de 1 pour 1. Autrement dit, les estimations régionales des dommages sont directement comparables entre elles et il n'y a pas lieu de se poser la question de l'échelle de valeur à utiliser pour évaluer les risques auxquels sont exposés les pays en développement du fait des émissions des pays industrialisés.

Si l'on adopte la règle "Un homme, un vote", le dommage θ_r subi par la région r est pondéré

par $\frac{C_r}{C} \frac{u'\left(\frac{C_r}{n_r}\right)}{u'\left(\frac{C}{N}\right)}$. Par rapport à une simple somme des pertes et gains régionaux, les régions

les moins développées (où le revenu *per capita* est inférieur à la moyenne mondiale) se voient accorder un poids plus important du fait de la décroissance de l'utilité marginale :

$$\frac{C_r}{n_r} \leq \frac{C}{N} \leq \frac{C_{r'}}{n_{r'}} \Rightarrow u'\left(\frac{C_r}{n_r}\right) \geq u'\left(\frac{C}{N}\right) \geq u'\left(\frac{C_{r'}}{n_{r'}}\right) (> 0) \Rightarrow \frac{u'\left(\frac{C_r}{n_r}\right)}{u'\left(\frac{C}{N}\right)} \geq 1 \geq \frac{u'\left(\frac{C_{r'}}{n_{r'}}\right)}{u'\left(\frac{C}{N}\right)}$$

Symétriquement, les régions les plus riches se voient accorder un poids plus faible que précédemment. Autrement dit, un dollar perdu comptera plus dans une région pauvre que dans une région riche. Dans ce cas, pour comparer et agréger les estimations régionales des dommages, on doit les réévaluer modulo les utilités marginales. En se rappelant que les

dommages sont majoritairement ressentis par les pays les moins avancés, on pressent que Θ est inférieur à la valeur déterminée quand on suit le principe "Un homme, un vote".

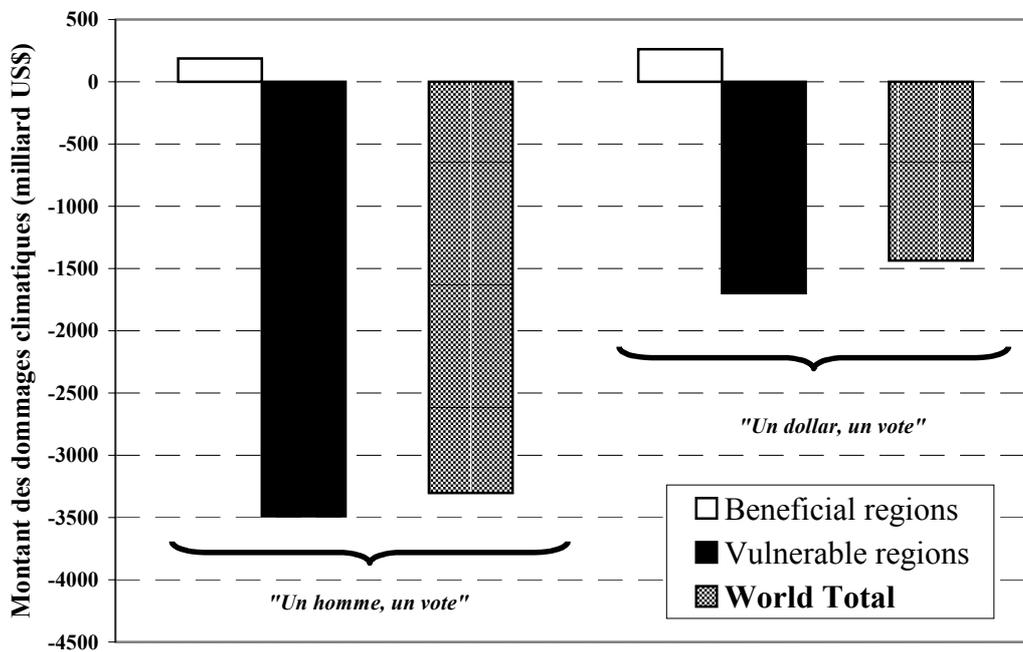


Figure I-7. Dommages régionaux et transferts

Nous avons évalué numériquement l'impact des considérations d'équité sur l'agrégation à partir des estimations de [Mendelsohn et al., 1997] (voir Figure I-7). On fait l'hypothèse que la fonction d'utilité est un logarithme népérien. Quand on suit la règle "Un homme, un vote", le dommage résultant à l'échelle mondiale correspond à une perte de 2,77% du PIB mondial tandis que pour la règle "Un dollar, un vote", il correspond à une perte de 1,20% du PIB mondial (soit moins de la moitié de la valeur précédente). En étudiant le montant des transferts entre « gagnants » et « perdants », on peut constater que l'effet des pondérations est de majoritairement renforcer le poids des régions vulnérables en regard du poids des régions bénéficiaires. Les pertes en bien être varient en effet du simple ou double tandis que les gains en bien-être diminuent du tiers ; les transferts consentis des « gagnants » vers les « perdants » restent en revanche à peu près constants : de l'ordre de 0,35 % du PIB des régions bénéficiaires [Ambrosi et al., 2002].

III.3. Le choix d'une métrique : un arbitrage entre précision et pertinence

La discussion précédente indique clairement que le choix d'une mesure des bénéfices des politiques climatiques et en même temps du cadre d'analyse de la décision approprié - dont le troisième rapport du GIEC ([Metz et al., 2001], au chapitre X) montre la très grande diversité qui a été appliquée au cas du changement climatique : analyse coût efficacité, Safe Landing Analysis et Tolerable Windows Approach, analyse coût bénéfice, approche par scénario - relève, au-delà d'un ensemble de questions techniques⁵³, de jugements de valeur (prend-on ou pas le risque de la valorisation des impacts en dommages ?) et d'une interrogation sur l'éventualité de disposer à *temps* d'estimations relativement fiables et non controversées des dommages [Ambrosi et al., 2003].

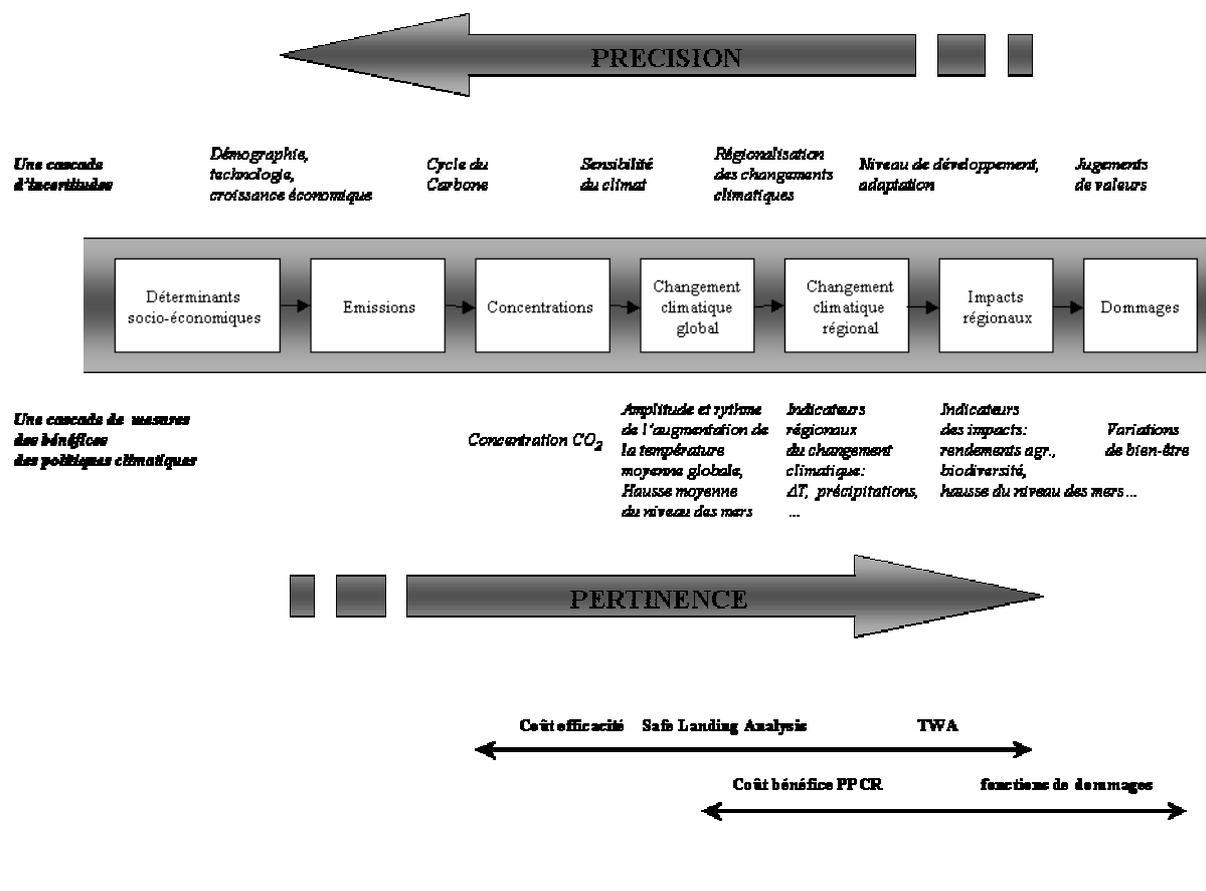
Ainsi, le troisième rapport du GIEC fait apparaître que la température moyenne globale de surface pourrait s'élever de 1,4 à 5,8 °C en 2100 par rapport à l'année 1990, principalement en raison des émissions de GES produites par les activités humaines ([Houghton et al., 2001], chap. IX). En présence d'une telle information, quelles mesures prendre face au risque climatique ?

Une première attitude consiste à considérer qu'elle est suffisamment inquiétante pour prendre des mesures de précaution dès aujourd'hui face à ce qui apparaît comme un pari à l'issue incroyablement risquée. L'action immédiate semble encore plus justifiée dès que l'on regarde, non plus les valeurs moyennes des estimations, mais la valeur basse de la fourchette et que l'on prête attention à la signature régionale du réchauffement projeté : il apparaît alors que les hausses de température vont de 1 à 2 °C dans nos régions à 4 à 5 °C en Sibérie orientale, soit un choc climatique de grande ampleur dans une période de temps relativement courte.

À l'inverse, une seconde attitude consiste à considérer qu'un réchauffement entraînera certes des modifications de nos conditions de vie mais qu'il y a loin des impacts aux dommages : en quoi serait-ce un dommage si, par exemple, Deauville en venait à jouir du climat de Biarritz et si le blé poussait en Sibérie ? Pour répondre à cette question et évaluer la réalité des dommages, il faut se doter en aval de la hausse des températures d'une information dont nous avons vu qu'elle est aujourd'hui fragile.

⁵³ Comme l'angle d'attaque des études (s'intéresse-t-on davantage au processus de négociation ou aux articulations entre développement durable et politiques climatiques), la prise en compte de l'incertitude (analyse déterministe ou stochastique, modélisation de l'apprentissage, nature des distributions de probabilités) et, le cas échéant, son traitement (critère Maximax ou Maximin, critère miniMax Regret, analyse type Monte Carlo, espérance de l'utilité, appel aux modèles non-additifs).

Figure I-8. Du coût-efficacité au coût-bénéfice, un arbitrage entre Précision et Pertinence



C'est à dire que le choix d'une mesure relève en particulier d'un arbitrage entre précision et pertinence [Hammit, 1999], dont les termes sont représentés Figure I-8 :

- *Précision* avec laquelle peuvent être décrits les bénéfices des politiques climatiques selon la métrique choisie ; compte tenu de la cascade d'incertitudes tout au long de la chaîne causale qui conduit des émissions de GES aux dommages, cette précision s'affaiblit au fur et à mesure que l'on se déplace vers l'aval.
- *Pertinence* de cette description en regard des questions que se posent les décideurs : une métrique donnée permet-elle de relier de manière tangible pour les parties prenantes coûts de l'action et conséquences de cette action et dès lors de fournir des informations sur l'opportunité d'entreprendre une action plutôt que telle autre. Et cette pertinence en revanche s'accroît plus on se déplace vers l'aval.

Par exemple, pour une trajectoire d'abattement donnée, les concentrations atmosphériques des GES peuvent être déterminées avec un niveau de précision beaucoup plus fin que n'importe quel autre indicateur du changement climatique et de ses conséquences en aval du maillon concentration sur la chaîne causale ; elles sont donc un candidat idéal pour évaluer et comparer le coût des politiques de mitigation en fonction du niveau de protection de l'atmosphère atteint. En même temps, nous avons vu précédemment que nous avons des connaissances bien minces sur les impacts (et les dommages) des scénarios de stabilisation des concentrations

atmosphériques à différents niveaux ; il s'agit donc d'une échelle finalement peu pertinente. En particulier, il est impossible de choisir pour le moment un plafond de concentration qui correspondrait au seuil de perturbation dangereuse du système climatique - c'est à dire, en faisant l'hypothèse d'une fonction de dommages à seuil, le point où le bénéfice marginal de protection de l'atmosphère croît soudainement et, en dépit des incertitudes sur les coûts de réduction des émissions, a de grandes chances de couper la courbe de coût marginal de contrôle de la pollution.

A l'inverse, une mesure des bénéfices des politiques climatiques qui repose sur des estimations monétaires des dommages est a priori beaucoup plus pertinente pour définir quel montant des ressources doit être alloué à l'adaptation et à la mitigation, à quelle date et dans quelle région. Mais nous avons vu que de tels chiffres sont pour le moment trop incertains pour servir de base à un calcul coût-bénéfice.

Entre les deux, un ensemble de mesures (et les cadres d'analyse de la décision qui leur sont associés) cherchent à améliorer la pertinence de la description des bénéfices des politiques climatiques en allant vers des mesures de plus en plus explicites: on passe ainsi des concentrations à des indicateurs du changement climatique global (qui ont été retenus par le GIEC dans son dernier rapport - voir la Figure I-8), puis à ces mêmes indicateurs régionalisés et enfin à des indicateurs d'impacts (ce sont par exemple les *millions at risk* de [Parry et al., 2001] : les millions de personnes qui souffriront du changement climatique à cause de la hausse du niveau de mers, à cause des menaces sur les ressources en eau ou la sécurité alimentaire, à cause des risques sanitaires, ou les *five numeraires* de [Schneider et al., 2000a] : valorisation monétaire des impacts aux activités économiques et aux implantations humaines, nombre de vies menacées et risques sanitaires, indice de qualité de vie - incluant des dimensions psychologiques comme le fait de devoir migrer, la perte de paysages de valeur culturelle, etc., mesure des risques pour les écosystèmes et finalement indicateur de la distribution des risques). Mais, à chaque fois qu'un maillon de cette chaîne est franchi, l'incertitude explose : c'est l'incertitude sur les maillons précédents augmentée de l'incertitude propre à ce maillon.

C'est donc toute une palette de mesures des bénéfices des politiques climatiques qui existe au long de la chaîne causale qui conduit des émissions de GES aux dommages, depuis la plus imparfaite (mais la plus aisément évaluable), à savoir les concentrations, jusqu'aux plus proches de l'idéal théorique (mais les plus difficilement évaluables) que sont les fonctions dommages. L'intégration de ces mesures dans les cadres d'analyse de la décision obéit à l'une ou l'autre des deux logiques suivantes :

- soit un refus explicite de la valorisation des impacts en dommages. Dans cette configuration, les politiques climatiques sont élaborées de manière à satisfaire un ensemble de contraintes environnementales, qui correspondent à des seuils de danger - au sens où l'entend la Convention Climat. Ces contraintes sont fixées en fonction de croyance sur les dommages, comme nous l'avons vu précédemment, et dépendent également d'attitudes face au risque climatique. Ce qui différencie les cadres d'analyse de la décision qui sont employés ici est la manière dont est affinée la représentation de ce danger climatique : depuis une simple vision d'un risque global à long-terme (les plafonds de concentrations) jusqu'à une vision régionalisée et temporalisée des risques, qui fait intervenir des indicateurs du changement climatique et des impacts. Ainsi, les approches de type Tolerable Windows Approach incluent des contraintes sur l'amplitude et le rythme d'évolution de la température moyenne globale, sur la hausse du niveau des mers et éventuellement

sur la régression des écosystèmes ; de même, elles prennent en compte des contraintes de long-terme mais intègrent également des contraintes de moyen terme (horizon 2050).

- soit l'acceptation de la valorisation des impacts en dommages. Dans cette configuration, les politiques climatiques sont élaborées de manière à équilibrer pertes marginales de bien-être du fait des coûts des efforts de réduction des émissions et d'adaptation et gains marginaux de bien-être du fait de la protection accrue de l'environnement. Ce qui différencie les cadres d'analyse de la décision qui sont convoqués ici est la manière dont les pertes de bien-être sont représentées : d'une simple préférence pour le régime climatique que nous connaissons aujourd'hui, liée à une aversion au risque de changements climatiques inconnus, à une description approfondie des différents chemins qui conduisent des impacts du changement climatique aux dommages, par le truchement des fonctions de dommages.

Ce sont ces différentes attitudes face au risque climatique que nous allons examiner pour comparer les recommandations politiques auxquelles chacune d'entre elles aboutit. En descendant la chaîne causale qui va des émissions aux dommages, nous allons ainsi rencontrer trois grands types d'attitudes qui se distinguent par le choix d'une mesure pour capturer les bénéfices des politiques climatiques et le cadre d'analyse de la décision qu'elles convoquent :

- une première attitude considère que l'incertitude sur l'évaluation des impacts et des dommages est trop importante pour accueillir avec suffisamment de confiance les estimations qui circulent actuellement. Les bénéfices des politiques climatiques prennent donc la forme de contraintes dont la formulation relève de jugements de valeurs sur l'étendue des risques climatiques. Ces contraintes, nous l'avons vu, peuvent être plus ou moins informatives, depuis un jeu de plafonds de concentrations atmosphériques des GES, des seuils de température ou tout autre indicateur multidimensionnel. Nous nous intéresserons au Chapitre IV de cette thèse à un cas peu traité dans la littérature : une analyse coût-efficacité avec des contraintes portant sur l'évolution de la température moyenne globale. Nous introduirons bien sûr une contrainte sur l'amplitude du réchauffement, qui traduit les risques à long-terme, et une contrainte sur le rythme de ce réchauffement, qui replace la question des impacts dans une perspective dynamique.
- une deuxième attitude accorde davantage de confiance aux projections des modèles climatiques mais reste toujours aussi sceptique à propos de l'évaluation des dommages. A la différence de l'attitude précédente, elle abandonne ainsi un cadre normatif pour opérer une analyse coût-bénéfice. En revanche, à l'instar de l'attitude précédente, elle utilise à cette fin un indicateur du changement climatique en cours, qui sert de proxy à une description quantitative des dommages. Cet indicateur prend la place du bien E dans le modèle heuristique de l'Encadré I-1 et, dans un contexte où les évaluations des dommages sont encore fragiles, la fonction d'utilité du modèle traduit une préférence pour le régime climatique actuel qui conduit à le préférer à d'autres alternatives qui pourraient s'avérer en définitive défavorables. Elle exprime également les valeurs attachées à l'environnement, aménités et valeurs patrimoniales des paysages, préoccupations vis à vis des écosystèmes menacés et valeurs d'existence, valeurs qui pourraient finalement représenter une part significative des bénéfices des politiques climatiques. Selon les spécifications de la fonction d'utilité,

la qualité de l'environnement (ici indicée sur le climat) a, ou n'a pas, les caractéristiques d'un bien supérieur. C'est ce que nous étudierons au Chapitre V de cette thèse.

- une dernière attitude enfin exige une évaluation monétaire des impacts socio-économiques du changement climatique. Il s'agit certes d'un exercice périlleux, nous venons de le voir, mais dans la mesure où les controverses autour de la question des risques climatiques et des mesures de lutte à prendre sont vives, c'est un exercice nécessaire pour introduire des éléments de rationalité dans ce qui serait sinon un débat sans fin, entre les demandes disproportionnées de certains groupes environnementalistes et les résistances d'une partie de l'opinion devant des mesures jugées impopulaires. Compte tenu des très grandes incertitudes, c'est bien sûr un exercice à mener avec précaution mais la référence explicite aux fonctions de dommages permet d'examiner la validité des contraintes environnementales introduites précédemment en présence d'incertitude (quels sont les gains de passer d'une cible de stabilisation de 450ppm à 550ppm ?; existe-t-il des seuils dans les fonctions de dommages) et de tester les recommandations issues des analyses coût-bénéfice pour différents jeu d'hypothèses normatives (comme l'équité), qui constituent le noyau dur des controverses en la matière. Ces questions font l'objet du Chapitre VI de cette thèse.

Conclusion

En conclusion, il est manifeste pour le moment que nous sommes loin de pouvoir définir ce qu'est un changement climatique *dangereux*, selon les mots de la Convention climat. En particulier, la connaissance de notre vulnérabilité au climat - et comment elle est aggravée par le changement climatique - est encore trop incomplète pour que nous puissions produire des estimations fiables et non controversées des impacts du changement climatique et de leurs répercussions sur le bien-être des générations futures. C'est d'ailleurs vers une meilleure compréhension des vulnérabilités environnementales, économiques et sociales comme préalable à l'évaluation des impacts et des dommages que s'oriente maintenant une partie de l'effort de recherche⁵⁴ : on sort de l'impasse de travaux à vocation prédictive dont la base est à ce jour trop fragile pour commencer à définir « en creux » les risques climatiques. Il y a donc un changement de perspective : la question n'est plus « quels sont les dommages associés à telle évolution du climat ? » mais devient « quelles sont nos vulnérabilités au climat (déterminants, liens avec le scénario de développement, réalité de l'adaptation) et comment s'expriment-elles au long d'un scénario de changement climatique donné ? ». Les chantiers sont nombreux et portent notamment sur :

- la modélisation de l'adaptation : en cas de changement climatique rapide ou non anticipé pour explorer des situations où l'adaptation n'est plus optimale ni planifiée selon des anticipations parfaites,

⁵⁴ Voir par exemple, le programme britannique *UKCIP* (UK Climate Impacts Programme, <http://www.ukcip.org.uk/>) ou le projet européen *ATEAM* (Advanced Terrestrial Ecosystem Analysis and Modelling, <http://www.pik-potsdam.de/ateam/>).

- la connaissance des impacts pour les écosystèmes afin d'évaluer d'une part leur contribution directe au bien-être (et les gains à attendre de la lutte contre l'effet de serre additionnel) et surtout estimer les risques induits par la régression ou la disparition irréversible de certains d'entre eux,
- l'évolution des impacts le long des trajectoires de changement climatique : tout spécialement identifier les seuils de danger pour la sécurité alimentaire, l'approvisionnement en eau, la santé humaine ..., replacer ces différents stress dans le cadre des scénarios de développement pour caractériser la part de « responsabilité » du changement climatique et d'autres facteurs et identifier des stratégies de développement durable,
- la régionalisation des changements climatiques pour réduire les incertitudes sur les impacts et distinguer les zones particulièrement vulnérables où pourraient s'amorcer conflits ou migrations des *climate change refugees*,
- enfin la compréhension des liens entre impacts physiques, dommages économiques et variations de bien-être, c'est à dire en particulier progresser dans la connaissance des déterminants du bien-être des populations (préférences pour l'environnement, existence de besoins fondamentaux menacés par le changement climatique, degré d'aversion au risque)

Mais dans l'attente d'un diagnostic robuste, nous sommes renvoyés à des données peu satisfaisantes pour éclairer la décision collective. Tous les éléments sont en fait réunis pour faire du changement climatique un nouvel exemple, après le dossier de l'ozone stratosphérique ou des pluies acides, d'une situation de décision en univers controversé : l'ambiguïté atteint un niveau tel qu'il y a de grandes chances d'adopter une attitude de court-terme qui ne soit pas en proportion avec les réalités d'une menace de long-terme (car la demande sociale peut la sur-évaluer ou au contraire la sous-évaluer selon le contenu de l'actualité et l'accueil réservé aux différents discours sur le changement climatique) et d'assister à une paralysie des cycles de négociations, chaque partie campant sur des positions peu conciliables. C'est ce que nous allons étudier au chapitre suivant en remplaçant les nombreuses sources d'incertitude à l'œuvre dans un cadre plus général pour en examiner les implications vis à vis du problème de décision.

Références bibliographiques

- Ambrosi, P., J.C. Hourcade, S. Hallegatte, F. Lecocq, P. Dumas et M. Ha Duong (2003). Optimal control models and elicitation of attitudes towards climate damages, *Environmental Modeling and Assessment*, 8 (3), 133-147.
- Ambrosi, P., J.C. Hourcade et H. Le Treut (2002). Spatialisation des dommages et incertitude: primes de risques régionales et agrégation, in *Modélisation intégrée, évaluation des risques climatiques et des politiques de précaution: Programme GICC (Mete/MIES/Ademe), Rapport final*, J.C. Hourcade et H. Le Treut (dir.).
- Ayres, R.U. et J. Walter (1991). *The greenhouse effect: damages, costs and abatement*, 50 p, IIASA, Laxenburg (Austria).
- Azar, C. (1999). Weight factors in cost-benefit analysis of climate change, *Environmental and Resource Economics*, 13, 249-268.
- Barnett, J. et N. Adger (2001). *Climate Dangers and Atoll Countries*, (WP n°9). Tyndall Centre, Norwich (UK).
- Beniston, M. (2000). Impacts potentiels sur l'environnement alpin au XXI^{ème} siècle, Actes du colloque *Les changements climatiques et leurs incidences sur le milieu montagnard*, Chamonix (France), 29-30 juin.
- Berz, G. (2001). Insuring against catastrophe, *Our planet (UNEP): Special issue on Disasters*.
- Besancenot, J.P. (2000). Incidences possibles du réchauffement climatique sur la santé en France métropolitaine et dans les DOM-TOM au XXI^{ème} siècle, in *Impacts potentiels du changement climatique en France au XXI^{ème} siècle*, MIES et MATE (dir.), p 111-121, Paris.
- Besancenot, J.P., K. Laaidi et M. Laaidi (2002). Mortalité en France selon le contexte thermique: réalité présente et scénarios pour le XXI^{ème} siècle, Actes du colloque *Programme "Gestion et Impacts du Changement Climatique" (GICC): Séminaire de restitution*, MATE et MEDIAS FRANCE (org.), Toulouse (France), 25-26 avril 2002.
- Bruce, J.P., H. Lee et E.F. Haites (dir.) (1996). *Climate change 1995: Economic and social dimensions of climate change. Contribution of Working Group III to the Second Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, Cambridge University Press, Cambridge (UK&US).
- Burnouf, J. (2003). Mémoires environnementales contre amnésie sociale: la question du temps long dans l'espace des sociétés pour comprendre les événements extrêmes (chronologie, datation, durée), Actes du colloque *Changements globaux: vulnérabilité, adaptabilité, apprentissage; Apport des sciences humaines et sociales.*, Ministère délégué à la Recherche et aux Nouvelles Technologies, IHDP, INSU-CNRS, Programme GICC, INRA, IRD et INED (org.), Paris (France), 10 décembre 2003.
- Cline, W.R. (1992). *The Economics of Global Warming*, Institute for International Economics, Washington, D.C.
- Costanza, R., R. d'Arge, R. de Groot, S. Farber, M. Grasso, B. Hannon, K. Limburg, S. Naeem, R.V. O'Neill, J. Paruelo, R.G. Raskin, P. Sutton et M. van den Belt (1997). The value of the world's ecosystem services and natural capital, *Nature*, 387, 253-260.
- Dalton, M.G. (1997). The welfare bias from omitting climatic variability in economic studies of global warming, *Journal of Environmental Economics and Management* (33), 221-239.
- Davis, D., A. Krupnick et G. McGlynn (2000). Ancillary benefits and costs of greenhouse gases mitigation: an overview, Actes du colloque *Ancillary benefits and costs of greenhouse gases mitigation*, OECD (org.), Washington D.C.
- Deneux, M. (2002). *L'évaluation de l'ampleur des changements climatiques, de leurs causes et de leur impact prévisible sur la géographie de la France à l'horizon 2025, 2050 et 2100*, Rapport n° 3603 (Ass. Nationale)

- n° 224 (Sénat), Office parlementaire d'évaluation des choix scientifiques et technologiques (Assemblée nationale, Sénat), Paris.
- Easterling, D., G.A. Meehl, C. Parmesan, S.A. Changnon, T.R. Karl et L.O. Mearns (2000). Climate extremes: observations, modeling and impacts, *Science*, 298, 2068-2074.
- Eyre, N., T. Downing, R. Hoekstra, K. Rennings et R.S.J. Tol (1999). *ExternE (Externalities of Energy): Global Warming Damages*, Contract JOS3-C95-0002, European Commission: DG XII (Science, Research and Development).
- Fankhauser, S. (1994). The economic costs of climate change: a survey, *Global Environmental Change*, 4 (4), 301-309.
- Fankhauser, S. (1995). *Valuing climate change: the Economics of the Greenhouse*, Earthscan, London (UK).
- Fankhauser, S. et R.S.J. Tol (2002). *On climate change and economic growth*. Research Unit Sustainability and Global Change, Centre for Marine and Climate Research, Hamburg University, Hamburg (Germany).
- Fankhauser, S., R.S.J. Tol et D.W. Pearce (1997). The aggregation of climate change damages: a welfare theoretic approach, *Environmental and Resource Economics*, 10, 249-266.
- FAO (2002). FAOSTAT, FAO, Rome (Italy).
- FFSA (2000). Tempêtes de décembre 1999: coûts, indemnisation et enseignements, *Assurer*: 118.
- Fischer, G., S. Mahendra et H. van Velthuis (2002). *Climate Change and Agricultural Vulnerability*, 160 p, IIASA, Laxenburg (Austria).
- Fisher, A.C. et W.M. Hahnemann (1993). Assessing climate change risks: valuation of effects, Actes du colloque *Assessing surprises and nonlinearities in greenhouse warming*, J. Darmstadter et M.A. Toman (org.), RFF, Washington DC, May 1993.
- Grubb, M. (1993). The costs of climate change: critical elements, in *Costs, impacts and benefits of CO₂ mitigation*, Y. Kaya, N. Nakicenovic, W. Nordhaus et F.L. Toth (dir.), p 153-166, IIASA, Laxenburg (Austria).
- Guesnerie, R. (2003). *Kyoto et l'économie de l'effet de serre*, 265 p, La Documentation Française, Paris.
- Hammit, J.K. (1999). Evaluation endpoints and climate policy: atmospheric stabilisation, benefit-cost analysis and near-term green-house gas emissions, *Climatic Change*, 41, 447-468.
- Hanemann, M. (2002). Market benefits/impacts of climate change, Actes du colloque *OECD Workshop on the Benefits of climate policy: improving information for policy makers*, OECD (Paris), 12-13 dec. 2002.
- Hausmann, P. (1999). *Les inondations: un risque assurable*, 51 p, Swiss Re, Zürich (Switzerland).
- Houghton, J.T., Y. Ding, D.J. Griggs, P.J. Noguer, P.J. van der Linden, X. Dai, K. Maskell et C.A. Johnson (dir.) (2001). *Climate change 2001: the scientific basis. Contribution of Working Group I to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, Cambridge University Press, Cambridge (UK&US).
- Hourcade, J.C. (1996). Aspects socio-économiques (du Groupe III à la Synthèse): consensus espéré ou artefact rhétorique?, *Les Cahiers de Global Chance* (7), 63-72.
- Hourcade, J.C., F. Lecocq, T. Le Pesant et D. Théry (2002). L'économiste au risque des arguments d'équité: le cas des politiques climatiques, in *Régulation environnementale: jeux, coalitions, contrats.*, G. Rotillon (dir.), p 196, Economica, Paris.
- IEA/AIE (2001). *Electricity Information 2001*, IEA/AIE, Paris.

- IFEN (2000). *Aménagement du territoire et environnement: politiques et indicateurs*, 272 p, IFEN, Orléans (France).
- Jacoby, H.D. (2002). Informing climate policy given incommensurable benefits estimates, Actes du colloque *OECD Workshop on the Benefits of climate policy: improving information for policy makers*, OECD (Paris), 12-13 dec. 2002.
- Le Treut, H. et V. Serafini (2002). Modélisation intégrée et incertitudes sur les dommages du changement climatique: programme de recherche autour du modèle IMAGE, in *Modélisation intégrée, évaluation des risques climatiques et des politiques de précaution: Programme GICC (Mte/MIES/Ademe), Rapport final*, J.C. Hourcade et H. Le Treut (dir.).
- Lecocq, F. et J.C. Hourcade (2003). Equitable Provision of Long-Term Public Goods: The Role of Negotiation Mandates, *submitted to Journal of Public Economics*.
- Maddison, D. (dir.) (2001). *The Amenity Value of Climate*, 160 p, Earthscan, London (UK).
- Martin, E. (2000). Modification de la couverture neigeuse, in *Impacts potentiels du changement climatique en France au XXI^{ème} siècle*, MIES et MATE (dir.), p 54-57, Paris.
- McCarthy, J.J., O.F. Canziani, N.A. Leary, D.J. Dokken et K.S. White (dir.) (2001). *Climate Change 2001: Impacts, adaptation and vulnerability. Contribution of Working Group II to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, Cambridge University Press, Cambridge (UK & US).
- Mendelsohn, R. et A. Dinar (1999). Climate Change, Agriculture and Developing Countries: Does Adaptation Matter?, *The World Bank Research Observer*, 14 (2), 277-293.
- Mendelsohn, R., W. Morrison, M.E. Schlesinger et N.G. Andronova (1997). *Country-Specific Market Impacts of Climate Change*, crga.atmos.uiuc.edu/publications/market_impacts/text.html.
- Mendelsohn, R., W. Morrison, M.E. Schlesinger et N.G. Andronova (2000). Country-Specific Market Impacts of Climate Change, *Climatic Change*, 45, 553-569.
- Mendelsohn, R., W. Nordhaus et D. Shaw (1994). The Impact of Global Warming on Agriculture: A Ricardian Analysis, *The American Economic Review*, 84 (4), 753-771.
- Metz, B., D. Ogunlade, R. Swart et J. Pan (dir.) (2001). *Climate Change 2001: Mitigation. Contribution of Working Group III to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, Cambridge University Press, Cambridge (UK & US).
- Moreau, L. (2000). Observe-t-on déjà les effets du réchauffement climatique dans les Alpes?, Actes du colloque *Les changements climatiques et leurs incidences sur le milieu montagnard*, Chamonix (France), 29-30 juin 2000.
- Müller, B. (2002). *Equity in Global Climate Change: The Great Divide*, Oxford Institute for Energy Studies.
- Münich Re (1999). *Annual review of natural catastrophes 1999*, München (Germany).
- Münich Re (2000). *World of Natural Hazards*, CDROM.
- Münich Re (2003). *topics: Natural Catastrophes 2002*, 48 p, München Re, München (Germany).
- Nakicenovic, N. (dir.) (2000). *Special Report on Emissions Scenarios: a special report of Working Group III of the Intergovernmental Panel on Climate change*, Cambridge University Press, Cambridge (UK&US).
- Nicholls, R., F.M.J. Hoozemans et M. Marchand (1999). Increasing flood risk and wetland losses due to global sea-level rise, *Global Environmental Change*, 9 (Special Issue 'A new assessment of global effects of climate change'), 69-87.

- Nordhaus, W. (1991). To slow or not to slow: The economics of the greenhouse effect, *Economic Journal*, 101 (407), 920-937.
- Nordhaus, W. (1994a). Expert opinion on climatic change, *American Scientist*, 82, 45-52.
- Nordhaus, W. (1994b). *Managing the Global Commons: the Economics of Climate Change*, MIT Press, Cambridge(MA, USA).
- Nordhaus, W. (1998). New Estimates of the Economic Impacts of Climate Change, pp. 23.
- Nordhaus, W. et R. Boyer (1999). *Warming the world: Economics models of Climate Change*, MIT Press, Cambridge (MA, USA).
- OCDE (2001). *L'APD reste stable, les autres apports diminuent.*, Paris (France).
- O'Neill, B.C. et M. Oppenheimer (2002). Dangerous Climate Impacts and the Kyoto Protocol, *Science*, 296 (14 June 2002), 1971-1972.
- Parry, M. (1999). New estimates of climate change impacts, *Global Environmental Change* (Special issue "A new assessment of the global effects of climate change").
- Parry, M., N. Arnell, M. T., R. Nicholls, P. Martens, S. Kovats, M. Livermore, C. Rosenzweig, A. Iglesias et G. Fischer (2001). Millions at Risk: defining critical climate change threats and targets, *Global Environmental Change*, 11, 181-183.
- Parry, M.L. (dir.) (2000). *Assessment of potential effects and adaptations for climate change in Europe: the Europe ACACIA project*, 320 p, Jackson Environment Institute, University of East Anglia, Norwich (UK).
- Roby, J. (2000). Le tourisme de montagne face au changement climatique, Actes du colloque *Les changements climatiques et leurs incidences sur le milieu montagnard*, Chamonix (France), 29-30 juin 2000.
- Rosenzweig, C. et W.D. Solecki (dir.) (2001). *Climate change and a global city: The potential consequences of climate variability and change - Metro East coast*, 224 p, Columbia Earth Institute, New York (NY).
- Roughgarden, T. et S.H. Schneider (1999). Climate change policy: quantifying uncertainties for damages and optimal control taxes, *Energy Policy*, 27, 415-429.
- Schaeffer, R., J. Logan, A. Salem Szkló, W. Chandler et J. Gorlos de Souza (2000). *Developping countries and global climate change: electric power option in Brazil*. Pew Center.
- Schelling, T.C. (1992). Some economics of global warming, *American Economic Review*, 82 (1), 1-14.
- Schneider, S.H., K.K. Duriseti et C. Azar (2000a). Costing Nonlinearities, surprises and irreversible events, *Pacific and Asian Journal of Energy*, 10 (1), 81-91.
- Schneider, S.H., W.E. Easterling et L.O. Mearns (2000b). Adaptation: sensitivity to natural variability, agent assumptions and dynamic climate changes, *Climatic Change*, 45, 203-211.
- Secrétariat d'Etat au tourisme (2001). Chiffres clefs du tourisme.
- Smith, J.B. et S. Hitz (2002). *Estimating global impacts from climate change: Background paper for the OECD/WPGSP project "Benefits of climate policy"*, 94 p, Stratus Consulting Inc., Boulder (CO).
- Tegart, W.J.M., G.W. Sheldon et D.C. Griffiths (dir.) (1990). *Climate Change-the IPCC Impacts Assessment: Report prepared for IPCC by Working Group II*, Australian Government Publishing Service, Canberra (Au).
- Thomas, C.D., A. Cameron, R.E. Green, M. Bakkenes, L.J. Beaumont, Y.C. Collingham, B.F.N. Erasmus, M. Ferreira de Siqueira, A. Grainger, L. Hannah, L. Hughes, B. Huntley, A.S. van Jaarsveld, G.F. Midgley,

- L. Miles, M.A. Ortega-Huerta, A.T. Peterson, O.L. Phillips et S.E. Williams (2004). Extinction risk from climate change, *Nature*, 427 (8 January 2004 (6970)), 145-148.
- Titus, J.G. (1992). The cost of Climate Change to the United States, in *Global climate change: Implications, challenges and mitigation measures*, S.K. Majumdar, L.S. Kalkstein, B. Yarnal, E.W. Miller et L.M. Rosenfeld (dir.), Pennsylvania Academy of Science, Easton (PA).
- Tol, R.S.J. (1995). The Damage Costs of Climate Change: Toward More Comprehensive Calculations, *Environmental and Resource Economics*, 5, 353-374.
- Tol, R.S.J. (1997). On the Optimal Control of Carbon Dioxide Emissions: An Application of FUND, *Environmental Modelling and Assessment*, 2, 151-163.
- Tol, R.S.J. (1999a). *New estimates of the damage costs of climate change. Part I: Benchmark estimates*, (report n° D99/01), 29 p. Instituut voor Milieuvraagstukken (IVM), Vrije Universiteit Amsterdam, Amsterdam (the Netherlands).
- Tol, R.S.J. (1999b). *New estimates of the damage costs of climate change. Part II: Dynamic estimates*, (report n° D99/02), 37 p. Instituut voor Milieuvraagstukken (IVM), Vrije Universiteit Amsterdam, Amsterdam (the Netherlands).
- Tol, R.S.J. et H. Dowlatabadi (2002). Vector-borne diseases, Development and Climate change, *Integrated Environmental Assessment*, 2, 173-181.
- Tol, R.S.J., S. Fankhauser, R.G. Richels et J.B. Smith (2000). *How much damage will climate change do? Recent estimates*. Research Unit Sustainability and Global Change, Centre for Marine and Climate Research, Hamburg University, Hamburg (Germany).
- Tol, R.S.J., S. Fankhauser et J.B. Smith (1998). The Scope for Adaptation to Climate Change: What Can We Learn from the Impact Literature?, *Global Environmental Change*, 8 (2), 109-123.
- Toman, M.A. (1998). Why not to calculate the value of the world's ecosystem services and natural capital, *Ecological Economics*, 25 (1), 57-60.
- UNFCCC (1992). Convention-cadre des Nations Unies sur les changements climatiques (UNFCCC).
- Vörösmarty, C.J., P. Green, J. Salisbury et R.B. Lammers (2000). Global Water Resources: Vulnerability from climate change and Population Growth, *Science*, 289, 284-288.
- Watson, R.T. et the Core Writing Team (dir.) (2001). *Climate change 2001: synthesis report*, 398 p, Cambridge University Press, Cambridge (UK) and New York (NY, USA).
- Watson, R.T., M.C. Zinyowera, R.H. Moss et D.J. Dokken (dir.) (1996). *Climate Change 1995 - Impacts, Adaptations and Mitigation of Climate Change: Contribution of Working Group II to the Second Assessment Report of the IPCC*, Cambridge University Press, Cambridge (UK) & NY(NY).
- Watson, R.T., M.C. Zinyowera, R.H. Moss et D.J. Dokken (dir.) (1998). *The Regional Impacts of Climate Change - An Assessment of Vulnerability: A special report of IPCC Working Group II*, Cambridge University Press, Cambridge (UK) & NY(NY).
- Webster, M., C. Forest, J.M. Reilly, M.H. Babiker, D. Kicklighter, M. Mayer, R.G. Prinn, M. Sarofim, A. Sokolov, P. Stone et C. Wang (2002). *Uncertainty analysis of climate change and policy response*, 21 p, MIT report # 95, MIT Joint Program on the Science and Policy of Climate Change, Cambridge (MA).
- Weller, G. et M. Lange (1999). *Impacts of global change in the Arctic regions*, International arctic science committee Centre for global change and arctic system research, University of Alaska, Fairbanks (AK).
- World Bank (2002a). *Seas, Cities and Storms: Managing Change in Pacific Island Economies*, the World Bank, Washington D.C.

World Bank (2002b). World Development Indicators, the World Bank, Washington D.C.

WWF (2000). *Global Warming and Terrestrial Biodiversity Decline*, World Wide Fund for Nature (WWF), Gland (Switzerland).

Chapitre II

La décision au péril de l'incertitude scientifique

CHAPITRE II LA DECISION AU PERIL DE L'INCERTITUDE SCIENTIFIQUE73

I. Une incertitude scientifiquement irréductible ?77

I.1. Incertitude et complexité : l'incertitude dans l'évaluation intégrée du changement climatique.....78

I.1.1. Incertitude épistémologique78

A. Le niveau de formulation théorique : plusieurs explications en concurrence.....79

B. Mal tracer les frontières du système80

C. L'inconnu et les surprises81

I.1.2. Incertitude systémique : nature et poids des relations entre sous-systèmes.....82

I.1.3. Propagation des incertitudes dans le temps et dans les échelles spatiales : la prédiction inaccessible ...83

A. Incertitude et projections de long-terme.....83

Des difficultés théoriques et pratiques pour définir des trajectoires de long-terme83

Des systèmes non réductibles à une description déterministe87

B. Incertitude et régionalisation.....92

I.2. Incertitude et modélisation intégrée du changement climatique : la modélisation comme source d'incertitudes94

I.2.1. Multiplicité des représentations du monde, multiplicité des modèles.....94

I.2.2. L'incertitude paramétrique97

I.2.3. Propagation des incertitudes sur les résultats.....99

I.2.4. L'incertitude au futur100

II. Incertitudes et controverses du changement climatique103

II.1. Un futur non probabilisable : à quelle information sur l'aléa peut-on recourir pour décider ?104

II.2. Une mer d'incertitudes, des croyances hétérogènes et volatiles.....106

II.2.1. Une demande sociale mouvante face aux risques climatiques : fluctuations dans le cycle de vie des politiques publiques.....106

II.2.2. Préférences et coordination : des croyances sur le long-terme inconciliables au blocage sur la décision de court-terme109

Conclusion : Vers une décision séquentielle.....111

Références bibliographiques.....113

Table des figures

Figure II-1. La cascade d'incertitude dans l'évaluation intégrée des politiques climatiques.84

Figure II-2. Profils temporels du taux de fécondité moyen mondial pour les scénarios démographiques des Nations Unies, de l'IIASA et de la Banque Mondiale.86

Figure II-3. Comparaison des projections démographiques des scénarios IS92 (pointillé) et des scénario SRES (trait plein).86

Figure II-4. Stabilité et non-linéarité de la circulation thermohaline.89

Figure II-5. Bifurcations au sein des systèmes énergétiques et profils d'émissions de GES.....90

Figure II-6. Incertitude liée aux choix de modélisation : trajectoires d'émissions de GES optimales pour cinq modèles intégrés, calibrés sur un même jeu de données.96

Figure II-7. Calibration des fonctions de dommages pour différentes croyances.....98

Figure II-8. Profils d'abattement optimal obtenus avec le modèle DICE-92 pour chacune des fonctions de dommages présentées à la Figure II-7.....99

Table des tableaux

Tableau II-1. Croissance de l'incertitude sur le réchauffement moyen selon l'horizon de projection des modèles climatiques.....84

Tableau II-2. Croyances et positionnements pour l'évaluation des politiques climatiques.111

L'incertitude concernant l'étendue du changement climatique, ses conséquences économiques et sociales, les coûts des politiques de réduction des émissions et d'adaptation à ses impacts est souvent qualifiée dans la littérature d'accablante ou de désarmante (*overwhelming, daunting*), que ce soit du point de vue des planificateurs et des négociateurs, des citoyens ou de la communauté scientifique dans son ensemble. Qu'il s'agisse de réduire l'incertitude sur les scénarios d'émissions, les projections des modèles climatiques ou les évaluations des impacts, qu'il s'agisse de communiquer ces résultats et leurs nombreuses limitations (dont l'incertitude), qu'il s'agisse d'évaluer un éventail de politiques climatiques en présence de demandes sociales face au risque climatique très contrastées, qu'il s'agisse enfin, pour les citoyens, d'essayer de comprendre ce que sont le changement climatique et certains de ses enjeux, l'incertitude au cœur de ce phénomène rend la tâche extrêmement complexe.

Dans cette section, c'est d'une certaine manière vers chacun de ces groupes que nous allons nous tourner. Dans un premier temps, du côté de la communauté scientifique, pour présenter une typologie de l'incertitude afin d'en comprendre les origines et cerner les difficultés que pose son traitement dans les cascades de modèles convoqués pour l'évaluation intégrée des politiques climatiques. Dans un second temps, du côté des décideurs et des citoyens, pour examiner les implications de ces multiples sources d'incertitude vis à vis du problème de décision. Nous mettrons en évidence que le dossier climat relève typiquement des situations de décision en univers controversé, avec le risque d'une paralysie de l'action ou d'une action inappropriée et concluons sur la nécessité d'une approche séquentielle à la décision en matière de politiques climatiques.

I. Une incertitude scientifiquement irréductible ?

Au chapitre précédent, nous avons présenté l'incertitude sur les dommages en suivant une approche triptyque : en nous déplaçant au long de la chaîne causale qui va des émissions de GES aux dommages, nous avons rencontré successivement des incertitudes d'ordre socio-économique puis climatologique et enfin des incertitudes liées à la réponse des écosystèmes et des sociétés. On pourrait raffiner cette présentation en donnant pour chaque discipline impliquée (démographie, économie, sciences de l'ingénieur, climatologie, océanographie, écologie, agronomie, géographie, médecine, ...) les principales sources d'incertitude¹ mais, à part donner le juste sentiment que l'incertitude est présente dans toutes les composantes de l'analyse (et pas seulement les dommages climatiques), une telle présentation n'aide pas beaucoup à qualifier cette incertitude, en particulier dans ses liens avec la décision.

C'est pourquoi nous choisissons de présenter deux typologies de l'incertitude au cœur du changement climatique : la première, de nature heuristique, permet de relier cette incertitude à la complexité du système étudié, avec deux dimensions importantes du problème de décision que sont l'horizon de long-terme et les différents niveaux régionaux de décision ; la seconde, plus pragmatique, renvoie aux outils de modélisation comme source d'incertitude, alors même que les modèles jouent un rôle central dans la compréhension des phénomènes, l'intégration de scénarios et l'évaluation des politiques climatiques.

¹Une telle présentation de la cascade des incertitudes dans l'évaluation des impacts du changement climatique est disponible dans [Carter et al., 1999], où le lecteur pourra trouver une revue critique des principales incertitudes inhérentes à chaque discipline convoquée dans cet exercice.

I.1. Incertitude et complexité : l'incertitude dans l'évaluation intégrée du changement climatique

Cette première typologie s'appuie sur la complexité des mécanismes mis en œuvre dans le changement climatique, où les rétroactions entre les différents éléments sont extrêmement nombreuses et les échelles temporelles et spatiales très diverses. L'incertitude trouve d'abord sa source dans une connaissance limitée des composantes unitaires d'un système aussi complexe, elle s'amplifie du fait d'une connaissance également limitée de leurs interconnexions et elle se propage quand on navigue entre différents niveaux géographiques et quand on se déplace dans le temps.

I.1.1. Incertitude épistémologique

Ainsi on peut distinguer un premier niveau qui est lié à l'état de la connaissance d'un phénomène donné. Si on emprunte un exemple à la climatologie, de grandes incertitudes subsistent sur la participation des aérosols au bilan radiatif de l'atmosphère ([*Houghton et al.*, 2001], Chap. V): dans son dernier rapport, le GIEC estime avoir atteint à ce sujet un niveau très faible à faible de connaissance scientifique (*very low to low level of scientific understanding*, voir notamment [*Houghton et al.*, 2001], TS, fig. 9).

Ces incertitudes tiennent à la compréhension même des phénomènes impliqués. Les aérosols ont tout d'abord un effet direct sur le bilan radiatif de l'atmosphère : ils réfléchissent les rayonnements incidents et ont dans ce cas un effet refroidissant (comme les aérosols sulfatés et les aérosols issus de la combustion de la biomasse) ou au contraire les absorbent (comme la suie) et ont dans ce cas un effet réchauffant. Ils ont ensuite un effet indirect, mettant en jeu des mécanismes plus complexes comme leur interaction avec la formation des nuages. Pour faire progresser nos connaissances, un certain nombre de difficultés devront être surmontées, notamment l'absence de données étendues sur les propriétés physico-chimiques des aérosols², éléments nécessaires pour nourrir les modèles climatiques et valider leurs résultats.

Donnons un ordre de grandeur de ces incertitudes : l'estimation avancée par le GIEC (voir [*Houghton et al.*, 2001], chap. V) de la participation des aérosols issus de l'usage des combustibles fossiles au forçage radiatif par le seul effet direct aboutit à un intervalle de $-0,1$ à $-1,0 \text{ W.m}^{-2}$, soit une incertitude de 89% (à comparer au flux infrarouge supplémentaire reçu par les basses couches de l'atmosphère et la surface du fait de l'augmentation effective des GES - sur la période historique (*ca.* 1750-2000) - qui est d'environ $+2,5 \text{ W.m}^{-2}$). Pour les aérosols issus de la combustion de la biomasse, cette même incertitude est de 85% ($-0,1$ à $-0,5 \text{ W.m}^{-2}$). Pour l'effet indirect, aucune quantification n'était disponible lors de l'élaboration du troisième rapport du GIEC.

Ces incertitudes se répercutent de manière significative sur les projections du changement climatique, sinon à l'échelle globale - où le gaz carbonique est responsable de plus de 70 à 80% du forçage additionnel ([*Houghton et al.*, 2001], chap. VI, § 6.15.2.1) - mais à l'échelle régionale (qui est pertinente pour traiter des conséquences du changement climatique), échelle où la signature des aérosols est beaucoup plus marquée et pourrait notablement influencer les

² Par exemple, l'origine des différentes catégories d'aérosols (notamment, part anthropique et part naturelle ou leur nature (usage de combustibles fossiles, combustion de biomasse, ...)), leur durée de vie dans l'atmosphère et leur répartition verticale et régionale.

climats régionaux³. Il s'agit donc d'un terrain où de grandes marges d'incertitude subsistent et elles ont prêté à des interprétations politiques très différentes comme l'illustre la controverse Hansen⁴.

L'exemple des aérosols permet de comprendre que les incertitudes liées à la connaissance scientifique des mécanismes impliqués dans le changement climatique peuvent dépendre d'au moins trois causes :

A. Le niveau de formulation théorique : plusieurs explications en concurrence

C'est le sens de l'indicateur *Level of Scientific Understanding* (LOSU) utilisé par le premier groupe de travail du GIEC dans son dernier rapport [Houghton et al., 2001], développé pour identifier précisément cette source d'incertitude. On retrouve une approche identique dans la présentation de certains des résultats du GIEC (par exemple [McCarthy et al., 2001], chap. VII) sous forme d'un tableau à deux entrées, la première reliée au niveau de formalisation scientifique et la seconde renvoyant au degré de consensus au sein de la communauté.

Un premier exemple peut être avancé avec la question des liens entre réchauffement et cycle de l'eau, en particulier la rétroaction vapeur d'eau (qui est un gaz à effet de serre) et les processus de formation des nuages (dont pour le moment l'effet parasol, -50 W.m^{-2} , l'emporte sur la contribution à l'effet de serre, $+30 \text{ W.m}^{-2}$, [Kandel, 2002]). La rétroaction vapeur d'eau est l'une des incertitudes majeures dans la connaissance de la réponse du climat à un accroissement des concentrations atmosphériques des GES : elle pourrait en effet l'amplifier jusqu'à 50% voire plus. Toute la difficulté est d'estimer dans quelle mesure une perturbation du bilan radiatif de l'atmosphère, dans le sens d'une hausse, pourrait y augmenter la teneur en vapeur d'eau et par là, renforcer l'effet de serre additionnel. Une première école suggère que le réchauffement entraînant une augmentation de l'humidité atmosphérique et favorisant sa présence sous phase gazeuse, peut effectivement donner lieu à une rétroaction vapeur d'eau positive, qui amplifiera la sensibilité du climat à toute perturbation. La résultante dépend bien sûr de cette rétroaction et de la contribution des nuages. Une autre école suggère que si le réchauffement favorise la convection humide, de telles ascendances contribuent peu à enrichir en vapeur d'eau l'atmosphère puisque l'essentiel retombe sous forme de précipitations dans les mêmes zones : les zones sèches s'étendent tandis que les zones où se produit déjà l'essentiel des ascendances d'air humide reçoivent encore plus de précipitations.

³ A l'image du 'Nuage Brun' en Asie, composé d'aérosols d'origine diverse (feux de forêts, combustibles fossiles, usages domestiques de la biomasse) dont un rapport récent [PNUE/UNEP, 2002] analyse entre autres les impacts sur le climat régional et indique qu'il pourrait modifier de manière significative le régime des précipitations et les cycles de la mousson sur la région.

⁴ [Hansen et al., 2000] ont en effet suggéré de concentrer l'essentiel des efforts de réduction des émissions non pas sur le gaz carbonique mais sur les autres gaz à effet de serre (comme le méthane) et les suies, responsables selon les auteurs de l'accélération du réchauffement observée sur les dernières décennies. Cette proposition rencontre plusieurs limites - dont certaines que reconnaissent les auteurs - : d'abord l'incertitude, encore très grande, sur la participation des aérosols aux perturbations du climat et sur d'autres impacts potentiels de ces particules (santé humaine, agriculture) ; ensuite devoir émettre de plus en plus d'aérosols (à effet refroidissant) pour compenser l'accumulation du CO₂ dans l'atmosphère ; troisièmement, laisser 'filer' les émissions de CO₂ alors que c'est le GES avec l'une des plus grandes durées de vie et enfin, peu de données pour évaluer les coûts et l'efficacité technique des réductions des émissions des autres gaz.

Un autre exemple concerne les conséquences pour l'Europe d'une interruption de la circulation thermohaline dans l'Atlantique nord. Faisant suite aux inquiétudes manifestés par [Broecker, 1997] et [Rahmstorf, 1997] sur les conséquences d'une telle éventualité, les résultats obtenus par [Manabe et Stouffer, 1988] et [Rahmstorf et Ganopolski, 1999] suggèrent que l'interruption de la circulation thermohaline se traduirait par une chute de la température moyenne sur l'Europe océanique de 5 à 10°C. À l'inverse, l'étude de [Seager et al., 2002] tend à montrer que l'essentiel des apports de chaleur aux côtes européennes ne se fait pas par des voies océaniques mais atmosphériques, suggérant dans ce cas qu'une interruption de la circulation thermohaline n'aurait pas à ces latitudes des conséquences aussi dramatiques.

B. Mal tracer les frontières du système

Définir le système à étudier est le préalable à toute tentative de décrire, comprendre et prévoir les phénomènes que l'on cherche à caractériser. Une définition inappropriée peut entraîner l'omission de variables déterminantes et une mauvaise appréciation des liens de causalité et des relations entre différents phénomènes.

En guise d'illustration, on peut prendre l'exemple de la 'fertilisation carbonée': au-delà du laboratoire et des serres des horticulteurs, observe-t-on (ou n'observe-t-on pas) une stimulation de la croissance des plantes en réponse à l'enrichissement de l'air en dioxyde de carbone ? Comme les végétaux, grâce à la photosynthèse, élaborent leurs propres constituants à partir du carbone atmosphérique, on a souvent suggéré que le changement climatique pourrait être bénéfique, au moins à court-terme, pour les agriculteurs, les forestiers et certains écosystèmes, puisque la croissance des végétaux se trouverait stimulée par un air plus riche en dioxyde de carbone. C'est le phénomène de fertilisation carbonée, mis en évidence au laboratoire et mis à profit en horticulture. Bien sûr, l'ampleur de la réponse dépend du type de métabolisme photosynthétique des plantes étudiées : les plantes de type C3 (la plus grande majorité, dont beaucoup d'arbres et de plantes cultivables comme le riz, le blé ou le soja), dont l'enzyme catalysant les réactions claires de la photosynthèse est peu efficace, sont susceptibles de présenter une réaction positive à l'enrichissement en dioxyde de carbone de l'air ambiant plus importante que les plantes de type C4 (essentiellement des plantes d'origine tropicale comme le maïs, le sorgho, le millet et la canne à sucre), dont l'enzyme fixe le carbone avec un rendement d'emblée beaucoup plus élevé que les précédentes.

Les expériences menées en laboratoire confirment l'intuition élaborée à partir de nos connaissances sur les mécanismes de la photosynthèse : on observe en présence d'un air enrichi en CO₂ une croissance accrue des jeunes plants s'accompagnant d'un usage plus efficace de l'eau par la plante. De tels résultats peuvent-ils s'extrapoler à l'échelle de la parcelle, de la forêt ou de l'écosystème et permettre d'envisager que le processus de fertilisation carbonée s'y déroule également, dans les proportions mises en évidence par l'expérience au laboratoire ? Un certain nombre d'études (voir entre autres, [McCarthy et al., 2001], chap. V), tendent à montrer que la croissance des plantes en réponse à une augmentation de la concentration atmosphérique du CO₂ est influencée par un ensemble de facteurs en interaction complexe, que les expériences du laboratoire peinent à prendre en compte au-delà du simple lien carbone atmosphérique/photosynthèse, et soulignent par là les très grandes incertitudes dans la prévision des impacts du changement climatique sur les écosystèmes.

Ainsi, une récente expérience de plein-champ menée pendant plusieurs années en Californie sur un écosystème de prairie [Shaw et al., 2002]. Les parcelles de cette prairie ont été

artificiellement soumises aux conditions environnementales qui pourraient régner dans cette région du fait du changement climatique : doublement de la concentration atmosphérique de CO₂, réchauffement moyen de +2°F (+1,11°C), une augmentation des précipitations annuelles de 50% et des dépôts d'azote en augmentation (résultant de l'usage des combustibles fossiles). Un des principaux résultats de l'étude a été de montrer que dans le cas de cet écosystème, la fertilisation carbonée n'apparaît que lorsque les autres facteurs sont maintenus à leur niveau de référence. Bien plus, tandis qu'une élévation de la température, des dépôts d'azote plus importants ou une augmentation des précipitations (un seul des facteurs ou combinaison pluri-factorielle) sont bénéfiques pour la croissance des parcelles, l'ajout d'un air enrichi en carbone aux conditions précédentes diminue ce gain de manière significative : la combinaison tri-factorielle (température, précipitation, azote) aboutit à la plus forte stimulation de la croissance des parcelles (+84%) mais l'ajout du CO₂ la réduit à 40%. L'équipe de chercheurs avance plusieurs hypothèses pour expliquer cet effet surprenant, comme l'effet d'un facteur limitant (phosphore, potassium), une compétition accrue pour une ressource entre les végétaux et la microfaune du sol activée par l'enrichissement en carbone, ou un facteur ignoré dans les batteries de mesures.

C. L'inconnu et les surprises

Les modèles climatiques réussissent maintenant, en prenant en compte des éléments de la variabilité interne du climat et des facteurs de forçage aussi bien naturels (cycle solaire, aérosols volcaniques) que d'origine humaine (les GES notamment), à reproduire les grands traits du climat sur la période où nous disposons de données relativement fiables et précises⁵. Pour autant, on ne peut interpréter ce succès des modèles comme une preuve de notre capacité à prévoir l'évolution d'un climat perturbé par les émissions de GES car ces dernières déplaceront le système climatique hors de l'espace de validation des modèles qu'est la période historique 1850-2000 ; tout au plus, démontre-t-il notre capacité à expliquer de manière satisfaisante les déterminants du régime climatique des 150 dernières années.

En effet, nous ne connaissons pas encore l'ensemble des comportements d'un système aussi complexe que la machine climatique, entre les facteurs de stabilité, les caractéristiques des processus de transition (facteurs déclenchants, phénomène d'hystérésis) et les liens qu'entretiennent entre eux les différents mécanismes du climat. Par exemple, les enseignements de la paléoclimatologie font apparaître l'existence d'autres régimes climatiques (le petit âge glaciaire en Europe entre 1550 et 1850, successions de périodes favorables et de sécheresses sur l'Amérique du Sud), de phases de transition relativement brutales (les événements de Dansgaard-Oeschger ou les événements de Heinrich), d'interactions entre mécanismes du climat (les interconnexions entre le système de la mousson et les oscillations type El Niño) dont les caractéristiques font encore l'objet de conjectures. En l'état donc, les modèles climatiques ne sont pas pour le moment en mesure de reproduire toute l'étendue des états et des dynamiques de la machine climatique.

Notre capacité prédictive reste tributaire des avancées de notre connaissance (en particulier, grâce aux progrès de la paléoclimatologie) et de notre capacité à les traduire dans les modèles climatiques. A la suite de [Zahn, 2003] force est de reconnaître *"It will require a concerted effort from those involved in the observational, modelling and palaeoclimate aspects of climate change to integrate knowledge of the various climatic regimes, past and present, to assess the 'teleconnections' between them, and the stability of their links through time. Only then will we*

⁵ voir entre autres [Houghton et al., 2001], chap. XII, fig. 12-7.

be able to forecast with any confidence potentially hazardous states of climate regimes - for instance, certain anomalies in sea-surface temperatures in the Pacific and North Atlantic that might promote conditions in which severe flooding occurs in monsoon regions”.

I.1.2. Incertitude systémique : nature et poids des relations entre sous-systèmes

Au niveau précédent qui concerne l'élaboration d'une théorie scientifique et la production d'éléments explicatifs, s'ajoute un deuxième niveau pour traiter des incertitudes liées à la nature et au poids des relations entre les différents éléments d'un système aussi complexe que notre environnement.

Cette question des interactions (relations et boucles de rétroaction) a déjà été soulevée avec l'exemple des inconnues sur la dynamique du climat ou des incertitudes sur la fertilisation carbonée. C'est une question essentielle pour faire progresser à la fois notre connaissance des mécanismes à l'œuvre et affiner notre capacité prédictive : quels sont les liens entre les différentes composantes, existe-t-il des boucles de rétroaction positives, déstabilisatrices, ou au contraire négatives, stabilisatrices, qui gouvernent l'évolution du climat, les dynamiques des écosystèmes ou les comportements humains. C'est donc en particulier un élément essentiel du développement des grands modèles intégrés et du contrôle scientifique de leurs résultats.

Il ne s'agit pas seulement de simples aspects techniques concernant la compatibilité numérique des codes de chacun des sous-modèles (langage de programmation, échange de variables entre différents modules présentant éventuellement des échelles de résolution spatiale ou des pas de temps différents) mais aussi d'aspects qui sont déterminants sur le comportement des résultats du modèle et ajoutent une part importante d'incertitude dans ces sorties. Ainsi, en raccordant des modèles élaborés par des équipes appartenant à des disciplines différentes (modèles climatiques, modèles de croissance de plantes, modèles du cycle du carbone, modèles économiques), il faut prêter une grande attention aux variables d'interface (y'a-t-il un risque d'omission ?) et aux relations qui définissent ces couplages (quelles boucles de rétroaction mettent-elles éventuellement en place ? et quels sont les gains respectifs de ces différentes constructions ?).

Prenons un exemple tiré des sciences du climat. C'est ainsi très récemment que l'on a été en mesure d'étudier les interactions entre changement climatique et cycle du carbone. Il fallait d'abord attendre le développement de modèles du cycle du carbone qui intègrent une représentation de la composante océanique du cycle (biosphère océanique et présence du carbone sous forme inorganique) et une représentation terrestre du cycle (sources et puits biosphériques). Cette étape a pris une dizaine d'années entre le début des années 90 et maintenant ([*Houghton et al.*, 2001], TS, box 3).

Un des enjeux est d'examiner comment l'activité des puits biosphériques et océaniques peut répondre à une augmentation de la concentration atmosphérique de CO₂ et au changement climatique. En particulier, le puits océanique continue-t-il de fixer du carbone malgré une saturation de la pompe des carbonates et une baisse de la solubilité du CO₂ en raison du réchauffement alors que la différence de pression partielle entre atmosphère et océan devient plus grande ? Quelle est la réaction des végétaux et des sols (qui dans les forêts tempérées contiennent environ deux tiers du carbone de l'écosystème et jusqu'à quatre cinquièmes pour les forêts boréales - [*Watson et al.*, 2000], chap. I, table 1.1) au réchauffement climatique ?

Des résultats récents [Cox *et al.*, 2000; Friedlingstein *et al.*, 2001] font état d'une boucle de rétroaction positive entre changement climatique et cycle du carbone : le changement climatique contribue à atténuer l'activité des puits, ce qui se traduit par davantage de carbone dans l'atmosphère donc plus de changement climatique, *etc.* L'amplitude de cet effet (à comparer à une situation sans couplage) diffère profondément entre les deux exercices : [Cox *et al.*, 2000] trouvent un écart de +270ppm tandis que [Friedlingstein *et al.*, 2001] trouvent un écart de +70ppm.

De grandes incertitudes subsistent donc mais elles suggèrent que les profils d'émissions compatibles avec un jeu de cibles de stabilisation des concentrations à long-terme devront être corrigés dans le sens d'une augmentation des efforts puisque cette rétroaction positive n'avait pas été prise en compte lors des premiers calculs qui remontent aux années 1995 (voir par exemple, [Bruce *et al.*, 1996], chap. X, § 10.5.3).

I.1.3. Propagation des incertitudes dans le temps et dans les échelles spatiales : la prédiction inaccessible

Enfin, on peut maintenant ajouter un dernier niveau, consacré à la résonance au long des ramifications entre climat/économie/société des incertitudes théoriques sur les phénomènes unitaires et des incertitudes sur les relations et les boucles de rétroaction au sein d'un système complexe : quelle est leur propagation, en particulier dans le temps et quand on descend à de petites échelles spatiales ?

Au chapitre précédent, nous avons rappelé que l'incertitude se propageait au long de la chaîne causale qui conduit des émissions de GES aux dommages et qu'elle s'amplifie au long de la cascade de modèles qui sont utilisés dans l'évaluation intégrée du changement climatique. C'est ce qui est représenté Figure II-1 où d'une part, on retrouve la représentation classique, unidirectionnelle, de la boucle qui va des déterminants socio-économiques aux impacts avec une explosion des incertitudes à chaque étape et d'autre part, cette boucle est ramifiée en raison du contenu des politiques climatiques et des interactions et des rétroactions entre ses différents éléments.

A. Incertitude et projections de long-terme

Ainsi l'incertitude croît presque mécaniquement avec l'horizon temporel. Par exemple, on peut analyser comment varie selon l'horizon de projection l'incertitude sur l'élévation de la température moyenne globale depuis 1990 à partir des résultats du GIEC pour chacun des SRES (Tableau II-1).

Des difficultés théoriques et pratiques pour définir des trajectoires de long-terme

Le même problème se pose en des termes symétriques pour les projections socio-économiques à long-terme. Qu'il s'agisse des projections démographiques, des sentiers de développement économique, des choix techniques, en savons-nous assez pour déterminer leur évolution à moyen et long-terme ? Nous allons choisir plusieurs exemples, pour montrer qu'en l'état les connaissances scientifiques et leur expression dans des modèles quantitatifs ne nous permettent

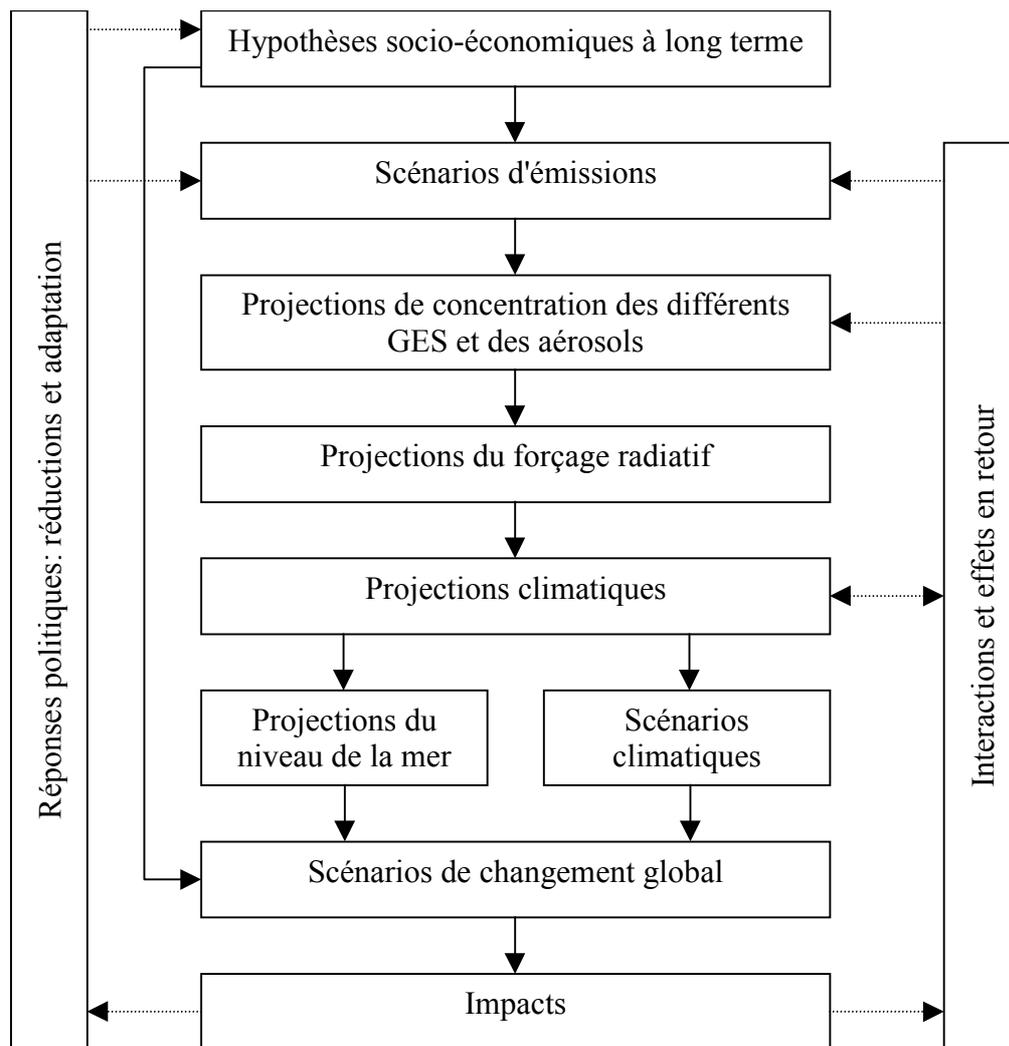


Figure II-1. La cascade d'incertitude dans l'évaluation intégrée des politiques climatiques.

Source: [Houghton et al., 2001], chap. XIII, Fig 13.2, traduction : E. Fortin.

Scénario	2030			2100		
	minimum (°C)	maximum (°C)	écart	minimum (°C)	maximum (°C)	écart
A1F	0,63	1,04	0,41	3,29	5,64	2,36
A1B	0,65	1,04	0,39	2,07	3,79	1,71
A1T	0,78	1,24	0,46	1,79	3,29	1,50
A2	0,54	0,92	0,38	2,79	4,75	1,96
B1	0,58	0,96	0,39	1,43	2,57	1,14
B2	0,69	1,13	0,43	1,93	3,43	1,50

Tableau II-1. Croissance de l'incertitude sur le réchauffement moyen selon l'horizon de projection des modèles climatiques.

Pour chacun des six marqueurs des scénarios SRES (en ligne), sont donnés pour deux dates (2030 et 2100) le minimum et le maximum et la différence des estimations de l'élévation de la température moyenne globale en référence à 1990, obtenus par les modèles du GIEC. On peut constater que, pour chaque scénario, l'incertitude des projections est croissante avec l'horizon de projection. Source : [Houghton et al., 2001], chap. IX, élaboré à partir de la fig. 9.15.

pas de qualifier avec suffisamment de confiance les mécanismes déterminants pour l'horizon de très long-terme.

L'enjeu de ces projections est multiple : envisager dans un cadre cohérent les profils d'émissions des GES⁶, les coûts de réduction des émissions, la vulnérabilité aux impacts et l'opportunité des stratégies d'adaptation, mais également donner des éléments pour définir la répartition des efforts entre Parties selon un ensemble de règles envisageables (allocation *per capita*, prise en compte du revenu avec la capacité à payer, répartition historique, responsabilité historique, approche sectorielle, mécanismes de convergence).

Un des principaux déterminants en est l'évolution démographique, qualifiée dans le rapport des SRES de *backbone* des scénarios d'émissions. Si dans l'ensemble ces prévisions atteignent une relative précision à court-moyen terme (en particulier comparativement à d'autres types de projections), on ne peut d'abord exclure certaines surprises, comme historiquement, le baby-boom après la deuxième guerre mondiale, la pandémie de SIDA ou la récente chute du taux de fécondité dans les pays en développement⁷. Cependant, même en laissant de côté de tels événements, de grandes incertitudes demeurent sur les processus de transition démographique des pays en développement (qui pèseront de plus en plus lourd dans la croissance démographique mondiale), notamment sur l'évolution du taux de fécondité.

En effet, la taille de la population est particulièrement sensible d'une part, à de relativement faibles variations du taux de fécondité à long-terme⁸ (et une question cruciale est celle de sa position par rapport au taux de renouvellement des générations, qui détermine si la population croît, décroît ou se stabilise) et d'autre part, à son profil d'évolution, même s'il atteint à long-terme une valeur faible.

Ces deux points sont l'occasion de controverses entre experts, à l'image des divergences entre les projections démographiques de l'IIASA d'un côté et des Nations Unies et de la Banque Mondiale de l'autre. Si on compare les scénarios des trois institutions (hypothèses centrales pour les Nations Unies et l'IIASA et le scénario de la Banque Mondiale), le taux de fécondité moyen mondial a une décroissance beaucoup plus lente dans le scénario de l'IIASA que dans les deux autres cas (qui suivent des évolutions similaires) ; il ne leur devient inférieur qu'à partir de 2075 et se stabilise en dessous du seuil de renouvellement des générations à la différence des deux autres scénarios où sa valeur de long-terme est précisément le taux de renouvellement des générations (Figure II-2). Ces hypothèses contrastées conduisent à des évolutions différentes de la population mondiale au cours du XXI^{ème} siècle : tandis que les projections des Nations Unies et de la Banque Mondiale suivent des trajectoires similaires, le scénario de population de

⁶ Trajectoires d'émissions dont les principaux déterminants sont la taille de la population, le niveau d'activité économique et sa structure, l'intensité énergétique de l'économie et la part des énergies fossiles dans son bilan énergétique, des considérations géographiques et les habitudes de consommation.

⁷ Ce dernier point est d'ailleurs la cause essentielle de la révision à la baisse par les Nations Unies de leurs projections, révision qui a reçu une grande attention quand elle a été annoncée en 1997 : par rapport aux estimations de 1994, la révision de 1996 prévoit quelque 500 millions de personnes en moins vers 2050 (soit près de 5% par rapport à l'ancienne référence). C'est la mise à disposition de données plus précises pour l'année 1995 sur le taux de fertilité moyen mondial (2,96 enfant par femme sur la période 1990-95) qui a amené à corriger les hypothèses formulées en 1994 sur ce paramètre (alors estimé à 3,1 enfant par femme). Cet écart s'explique surtout par la décroissance plus rapide qu'anticipé de la fertilité dans nombre de pays en développement et dans une moindre mesure, par des taux de mortalité plus élevés que prévu dans nombre de pays en raison de l'intensification des conflits dans cette décennie et de l'extension du SIDA.

⁸ Par exemple, pour les projections des Nations Unies, un écart de moins d'une demie unité entre le scénario central et la variante basse (taux de fécondité valant 2,1 enfant par femme et 1,7 enfant par femme respectivement) fait décroître la population mondiale en 2100 de plus de 46%.

l'IIASA leur est systématiquement supérieur (environ 1 milliard d'individus supplémentaires, en 2070, date à laquelle l'écart est le plus creusé) avant de converger vers les mêmes valeurs en 2100.

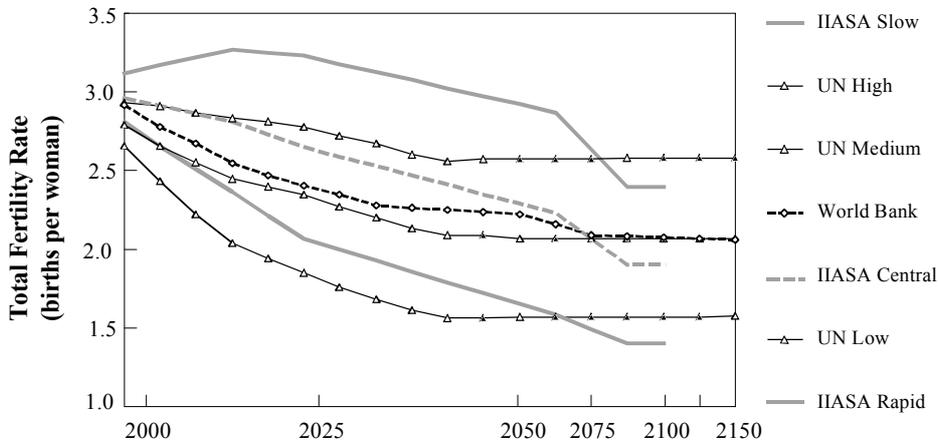


Figure II-2. Profils temporels du taux de fécondité moyen mondial pour les scénarios démographiques des Nations Unies, de l'IIASA et de la Banque Mondiale.

Source: [Nakicenovic, 2000], Fig. 3.5.

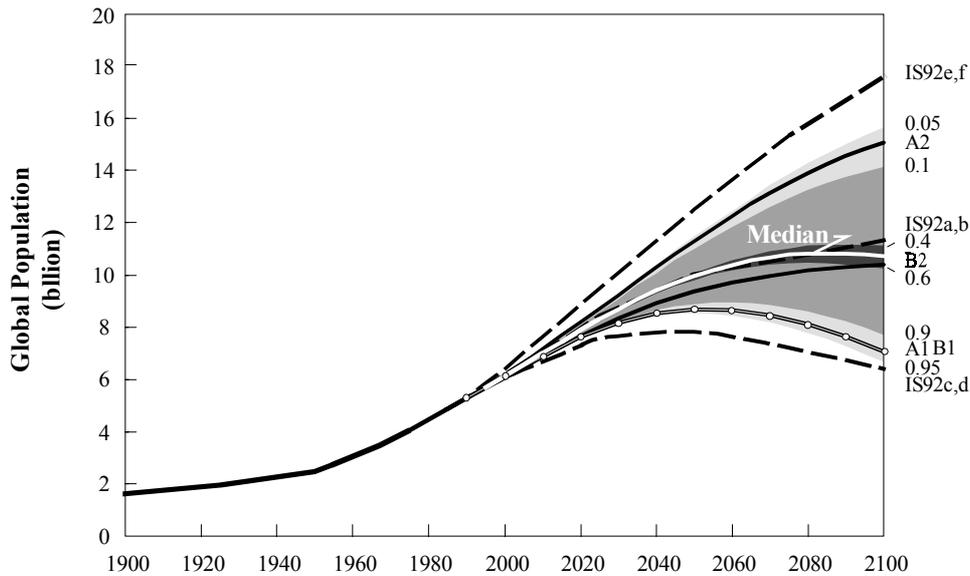


Figure II-3. Comparaison des projections démographiques des scénarios IS92 (pointillé) et des scénarios SRES (trait plein).

De manière générale, les scénarios SRES sont moins dispersés que la famille IS92 et le scénario moyen comme la variante haute sont en particulier inférieurs pour les scénarios les plus récents. A titre de comparaison, les résultats de l'étude probabiliste de [Lutz et al., 1997] sont également portés sur la figure. Source: [Nakicenovic, 2000], Fig. 3.8.

C'est pour refléter ces incertitudes que les composantes démographiques des scénarios SRES (voir la Figure II-3) ont utilisé le scénario médian des Nations Unies (scénario B2) et les scénarios haut (scénario A2) et bas (A1, B1) de l'IIASA. La famille recouvre ainsi des futurs très contrastés où la population mondiale atteint un pic vers 2050 et entre en décroissance (famille A1 et B1, 7,1 milliard d'individus en 2100), où au contraire elle continue de croître avec un rythme soutenu (scénario A2, 15 milliards d'individus en 2100) ou moins intense et

proche de la stabilisation (B2, 10,4 milliard d'individus en 2100). L'incertitude sur la population mondiale en 2100 selon ces scénarios est donc importante (plus d'un facteur 2) et épouse presque totalement la distribution proposée par [Lutz et al., 1997] à partir d'une étude probabiliste menée sur la base de dire d'experts pour les principaux déterminants des dynamiques démographiques⁹.

L'incertitude sur l'évolution de la population au XXI^{ème} se transmet bien évidemment aux perspectives de croissance économique. A ce niveau également, nous rencontrons des incertitudes liées à l'état de nos connaissances sur les mécanismes d'évolution des systèmes techniques, économiques et sociaux. Nous en donnons un exemple avec les difficultés pour expliquer et représenter le processus de croissance économique. L'article fondateur de Ramsey [Ramsey, 1928], les travaux de Harrod [Harrod, 1939] et Domar [Domar, 1946], le modèle néoclassique de croissance exogène développé par Solow [Solow, 1956] et Swan [Swan, 1956] et la contribution de Koopmans [Koopmans, 1965] sont autant d'approches formelles de ce phénomène qui ont permis de dégager des propriétés fondamentales de la dynamique des systèmes économiques, d'expliquer un certain nombre des faits stylisés observés par Kaldor [Kaldor, 1961] ou de dessiner un cadre d'analyse mis à profit par exemple par Maddison [Maddison, 1995] dans ses études empiriques. Mais dans l'état, ce corpus théorique, s'il reconnaît la nécessaire contribution de l'amélioration de la productivité générale des facteurs de production (le résidu de la décomposition de Solow) au processus de croissance, ne propose pas d'explication sur son origine¹⁰. C'est l'objet de la théorie de la croissance endogène que « [tenter] de comprendre l'interaction entre les connaissances techniques et les caractéristiques structurelles de l'économie et de la société, ainsi que la façon dont cette interaction se solde par la croissance économique ([Aghion et Howitt, 2000], chap. I) » mais les réponses qu'elle apportent sont encore partielles.

La liste des « vides de la connaissance » (*knowledge interstices*), selon le mot d'Hadi Dowlatabadi [Dowlatabadi, 1999], ne s'arrête pas là, bien entendu, mais cet exemple suffit pour confirmer que comme pour les sciences naturelles, les modélisateurs ne sont pas en mesure aujourd'hui d'identifier tous les déterminants ni de représenter tous les mécanismes des dynamiques socio-économiques de long-terme.

Des systèmes non réductibles à une description déterministe

Est-ce à dire qu'en supposant des avancées majeures dans la connaissance des systèmes en jeu, la mise à disposition de séries données sans défaut pour renseigner l'état passé et présent du monde et la maîtrise de modèles très sophistiqués, nos projections futures en deviendraient mécaniquement plus fiables ? Autrement dit, plus les états passés et présents du système ainsi que les dynamiques qui en gouvernent l'évolution seraient représentées avec acuité, plus les résultats du modèle se rapprocheraient de ce que sera effectivement l'état futur de la nature.

⁹ Ainsi, le cinquième et le quatre-vingt quinzième percentiles correspondent à l'intervalle 6,7 à 15,6 milliards d'individus. Les scénarios les plus extrêmes (A1, A2 et B1) se situent respectivement entre le cinquième et le dixième percentiles (A1, B1) et le quatre-vingt-dixième et le quatre-vingt-quinzième percentiles (A2). Le scénario B2 est compris entre le quarantième et le soixantième percentiles.

¹⁰ Par exemple, l'hypothèse d'un progrès technique autonome ne donne pas de réponse satisfaisante à l'existence de pièges de pauvreté qui mettent à mal l'hypothèse de rattrapage ailleurs qu'entre pays industrialisés [Barro, 1991; Summers et Heston, 1991]

C'est faire l'hypothèse que ces systèmes sont réductibles à une description déterministe et oublier deux sources majeures d'incertitude :

- l'incertitude *stochastique*, définie comme suit par [Dowlatabadi, 1999] : 'where the characteristic behaviour is well known, but varies over time and may not be represented by a single draw from a distribution for all time'. C'est par exemple le cas de la variabilité naturelle du climat (variabilité interannuelle ou cycles de périodes plus longues) qui pour le moment est très mal appréhendée (surtout pour les phénomènes de longue période) car les séries d'observations sont brèves (un peu plus de 100 ans) et déjà bruitées par le signal du changement climatique. Il est donc difficile d'estimer jusqu'à quel point les GCMs sont capables de reproduire cette caractéristique du climat et plus encore comment ils projettent son évolution [Hulme et Carter, 1999].
- et l'incertitude *structurelle*. C'est toute la difficulté des exercices de prospective de long-terme : assistons-nous à un changement dans la continuité (essentiellement quantitatif) ou y'a-t-il de la place pour des ruptures profondes et l'irruption de la nouveauté, introduisant par là des modifications qualitatives.

Ces éléments contribuent à rendre imprédictible le système climat/environnement/sociétés : il reste donc une part d'incertitude non réductible dans les projections à long-terme qui rend inaccessible toute prévision. Voyons-en des exemples en provenance de la climatologie et des sciences sociales.

Premièrement, le système climatique, comme système dynamique non-linéaire complexe, présente un comportement chaotique : de petites variations de l'état initial peuvent se traduire par de grandes divergences sur les sorties finales du modèles, en raison de bifurcations dans la trajectoire du système. C'est l'exemple du comportement de la circulation thermohaline (Figure II-4) qui, dans le modèle proposé par Stommel [Stommel, 1961], peut s'interrompre si les apports d'eau de faible salinité sont trop importants ; même si ces apports viennent à diminuer, le processus de formation des eaux profondes dans l'Atlantique Nord ne se réamorce pas, maintenant interrompue la circulation thermohaline dans cette zone.

Un autre exemple de ce comportement chaotique du système climatique est donné par la dispersion des résultats obtenus lors des simulations d'ensemble où le même modèle climatique tourne plusieurs fois de suite avec le même scénario d'émission. La comparaison des différentes simulations permet d'appréhender le nature de la réponse statistique du modèle, en particulier pour la description du climat à petite échelle, qui montre comment le modèle rend compte de la variabilité naturelle du climat.

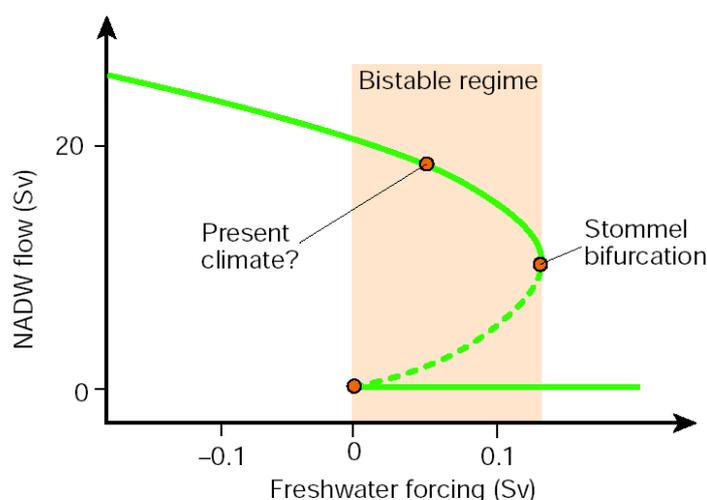


Figure II-4. Stabilité et non-linéarité de la circulation thermohaline.

Un des processus-clés de la circulation thermohaline est la formation des 'eaux profondes' : c'est à dire la subsidence de masses d'eau froide, qui sont aux hautes latitudes (où se produit le phénomène), celles de plus grande densité. Il existe quatre zones de subsidence : au sud du Groënland et au nord de l'Islande pour l'Hémisphère Nord, et en mer de Ross et mer de Weddell dans l'océan Glacial Antarctique. L'influence de la salinité est cependant importante puisqu'elle participe aux différences de densité entre masses d'eau et est à l'origine du comportement non-linéaire du système. Elle crée en effet une boucle de rétroaction positive : l'apport d'eau de plus grande salinité (on se déplace vers la gauche sur l'axe des abscisses) renforce le processus de formation des eaux profondes et la circulation, qui à son tour apporte davantage de masses d'eau de salinité élevée (en provenance des basses latitudes). Si en revanche, on assiste à un apport d'eau de faible salinité au voisinage des zones de subsidence (on se déplace vers la droite), la circulation s'en trouve ralentie, appelle moins de masse d'eau de salinité élevée, jusqu'à atteindre le décrochement de la formation des 'eaux profondes' et l'arrêt de la circulation thermohaline. Des observations paléoclimatologiques ont mis en évidence l'existence de tels basculements dans l'Atlantique Nord. Le changement climatique pourrait y contribuer en augmentant les apports d'eau douce dans cette zone, soit par des précipitations accrues, soit par l'injection d'eau douce en provenance des continents (source pour la figure : [Rahmstorf, 2002]).

Deuxièmement, comme la dynamique des systèmes naturels, les dynamiques socio-économiques (dont les politiques climatiques) sont irréductibles à une description déterministe. Il est possible d'en lister au moins deux causes, liées aux difficultés de traiter des comportements (comment les agents anticipent) et de représenter les facultés créatrices de l'homme :

- *équilibres multiples à long-terme et existence de bifurcations dans les systèmes technico-économiques*

Empruntons un exemple aux travaux de Gritsevskiy et Nakicenovic sur la dynamique du progrès technique endogène [Gritsevskiy et Nakicenovic, 2000]. Leur étude porte sur les systèmes énergétiques à long-terme et montre que parmi les très nombreuses trajectoires technico-économiques envisageables aujourd'hui (520 au total), celles dont les coûts globaux sont les plus faibles (au nombre de 53) recouvrent des réalités très différentes : pour un même profil de demande d'énergie utile, elles épousent une grande partie de l'intervalle des scénarios d'émissions de GES de la littérature, en reposant soit sur une dépendance de plus en plus marquée aux énergies fossiles soit sur une transition plus ou moins complète vers d'autres sources énergétiques. Ces deux pôles ne peuvent être discriminés aujourd'hui et ils reflètent chacun des anticipations contrastées sur le progrès technique et les comportements en réponse

aux signaux-prix et d'autres signaux contextuels. C'est pendant les premières décennies de ce siècle que s'opère le processus de différenciation, selon des modalités difficiles à anticiper. De manière similaire à [Krugman, 1991], l'analyse de Gritsevskiy et Nakicenovic souligne l'importance de la dépendance au chemin suivi en présence d'incertitude sur le progrès technique endogène : ce dernier se traduit par des rendements croissants d'adoption, qui renforcent de manière autocatalytique les choix techniques effectués et aboutissent en définitive à un effet de *lock-in* dans un profil énergétique donné. C'est également le cas de la compétition entre techniques émergentes (les normes de DVD, par exemple) ou le choix de perspectives d'aménagement du territoire, situations dont l'issue reste *a priori* difficile à déterminer.

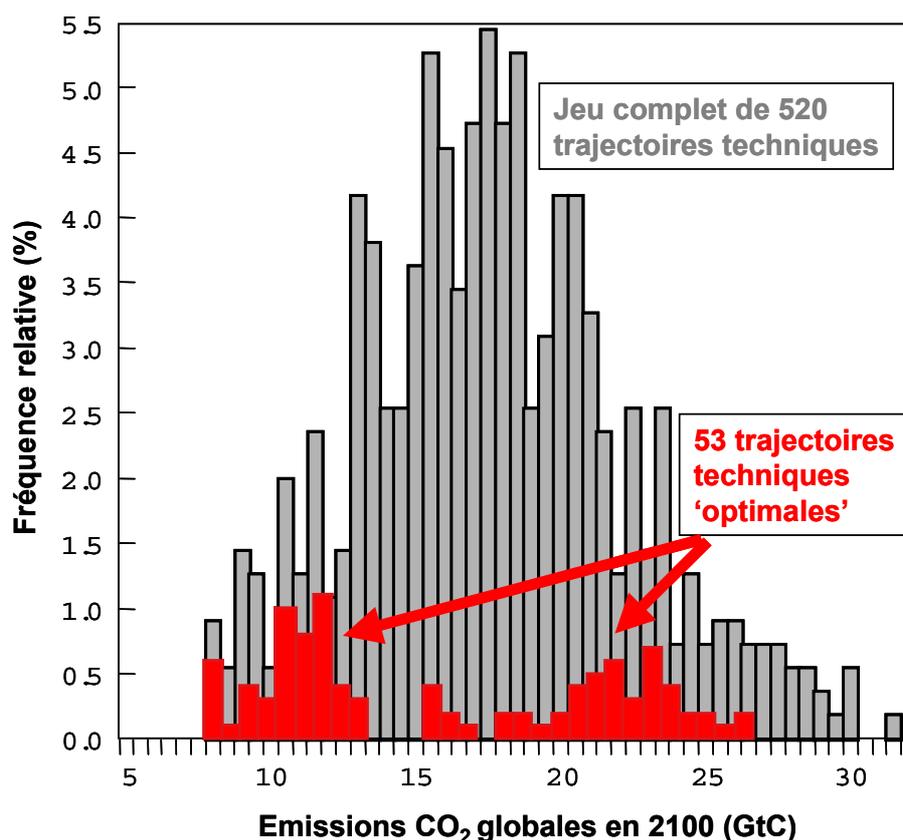


Figure II-5. Bifurcations au sein des systèmes énergétiques et profils d'émissions de GES.

Les histogrammes gris clair représentent les émissions mondiales de CO₂ en 2100 pour l'ensemble des scénarios énergétiques produits par le modèle MESSAGE à partir de 520 trajectoires techniques. Les histogrammes gris foncé représentent dans cet ensemble les trajectoires dont le coût global est le plus faible (défini comme le premier percentile en suivant les coûts croissants). On peut constater que les secondes se répartissent en deux sous-ensembles correspondant à des profils énergétiques au contenu carbone très différencié. Ces scénarios correspondent à un même profil de demande d'énergie utile, ils ne diffèrent donc que du point de vue de l'offre du système énergétique. Source : [Gritsevskiy et Nakicenovic, 2000].

Les analyses *a posteriori* montrent que les modalités de telles décisions, prises parfois en présence de signaux-prix faiblement différenciés, relèvent entre autres d'un poids historique (c'est l'exemple de l'effet de *lock-in* dans le maintien généralisé du clavier QWERTY dans le monde anglo-saxon¹¹) ou du contexte social (les phases de sous-concernement et de sur

¹¹ Le clavier QWERTY a été développé pour remédier aux problèmes mécaniques posés par les premières machines à écrire (emmêlement des leviers portant les caractères). Son inventeur a ainsi fait en sorte d'éloigner au maximum sur le clavier les paires de lettres dont les combinaisons successives reviennent le plus fréquemment ;

concernement en situation de crise environnementale¹²). Les modalités de ces choix restent donc très difficiles à anticiper (et presque impossibles à modéliser) et dépassent de loin le schéma de rationalité des agents économiques répondant aux seuls signaux-prix, telle qu'elle est représentée simplement par la maximisation d'une fonction d'utilité sous contrainte de ressources.

Cette grande sensibilité des trajectoires technico-économiques incluant bifurcations et irréversibilité à long-terme se rencontre dans d'autres domaines que l'innovation technique comme la polarisation des activités économiques autour de certains sites, résultant des externalités positives liées à l'effet de réseau de certains types d'infrastructures publiques [Krugman, 1993], ou les phénomènes de bulles spéculatives sur les marchés financiers [Azariadis et Guesnerie, 1986]. Autant de caractéristiques des dynamiques socio-économiques qui rendent impossible toute projection *mécanique* à long-terme.

- *surprise et nouveauté : « Natura non facit saltus ? »*

Par nature, l'inattendu n'est pas prévisible et les projections de long terme ne peuvent rendre compte des surprises (comme les chocs pétroliers, les conflits, les crises économiques, le refus du nucléaire, le changement des préférences alimentaires d'une alimentation carnée vers une alimentation végétarienne, etc.). Une des catégories de surprises concerne l'apparition de nouvelles techniques, comme la *backstop technology* pour les réductions des émissions ou le développement de nouvelles variétés comme adaptation du secteur agricole au changement climatique. C'est une difficulté majeure, par exemple, dans les exercices de prospective énergétique que d'envisager au-delà d'une évolution continue des systèmes énergétiques, l'existence de rupture en leur sein en raison de la nouveauté. Rétrospectivement, on peut se souvenir des inquiétudes malthusiennes exprimées par Jevons [Jevons, 1865], qui prévoyait en 1865 des menaces sur la suprématie industrielle et commerciale de la Grande Bretagne au cours du XX^{ème} siècle, Grande Bretagne qu'il imagine être encore dans l'âge du charbon.

Dans certains modèles énergétiques par exemple (tel le modèle *TIMER* du RIVM), le panier des techniques correspond aux sources d'énergie qui existent actuellement ; ce sont des hypothèses sur l'amélioration de leur rendement, l'évolution de leur coût (investissement initial, maintenance et durée de vie) qui déterminent leur part dans le bilan énergétique en fonction de la demande et du contexte institutionnel (taxes et normes). Il n'y a donc aucun processus de nouveauté (*genesis*) dans l'évolution des techniques, c'est plutôt une cinétique des techniques (*kinesis*). Le modèle MESSAGE de l'IIASA en revanche tente de représenter un changement qualitatif en prenant en compte, parmi les caractéristiques des techniques, la date à laquelle elles seront disponibles. Il y a donc d'une certaine manière apparition de la nouveauté mais cette manière de traiter l'innovation dépend bien sûr des dires d'experts et de leurs

l'objectif n'était donc pas d'augmenter la vitesse de frappe par le simple agencement du clavier (dans le sens d'une meilleure ergonomie) mais d'éviter ces fâcheux emmêlements (qui eux la ralentissent). A l'ère des machines à écrire électriques et de l'informatique, ce problème ne se rencontre plus. Pour autant, le clavier QWERTY continue à s'imposer alors que d'autres dispositions des lettres, comme le clavier DVORAK, permettraient théoriquement d'accélérer la vitesse de frappe ou d'augmenter son ergonomie. [David, 1985] explique que le maintien du QWERTY en position dominante (effet de lock-in) tient à trois traits : complémentarité technique (entre le clavier et la mémoire des dactylos), économie d'échelle (au fur et à mesure que les autres types de clavier disparaissaient au profit du QWERTY) et quasi-irréversibilité (une fois que les dactylos sont formés).

¹² Effectivement, les préférences environnementales sont souvent influencées par le cycle de vie des crises environnementales : par exemple, les deux tempêtes de l'hiver 1999 et le naufrage de l'Erika se sont répercutées dans l'opinion par des inquiétudes sur la réalité des menaces de l'effet de serre ainsi que sur le poids de notre empreinte sur l'environnement. De même, les émissions de télévision et les éditions magazines présentant tour à tour le changement climatique comme une catastrophe ou une imposture.

anticipations et est par nature incorporée au modèle. Nous sommes ici dans le domaine de la surprise: sur les 50 prochaines années, y'aura-t-il une révolution technique dans le domaine de l'énergie (amélioration considérable du rendement des photopiles, progrès sur le nucléaire)? On peut s'interroger sur la faisabilité d'une telle modélisation et sur les dangers de prescrire une politique en supposant l'apparition de techniques-miracle dans l'éventualité où finalement elles ne se développent pas.

B. Incertitude et régionalisation

Ainsi, la nature même des dynamiques sociales, économiques, techniques comme des dynamique des systèmes naturels, rendent inaccessible toute prévision à long-terme. En miroir d'une incertitude qui augmente dans le temps, l'incertitude sur les déterminants du changement climatique, son étendue, ses conséquences et les coûts des politiques climatiques croît également quand on descend de l'échelle globale aux échelles régionales. Nous en avons déjà donné un exemple au chapitre précédent en mentionnant comment, même derrière des évaluations des dommages résultants à l'échelle mondiale relativement identiques, se dissimulaient des réalités régionales et sectorielles bien différentes.

Construire un modèle global avec une grande précision géographique - c'est à dire un modèle où interagissent de très nombreuses échelles - n'est pas possible, pour des raisons d'ordre théorique (connaissance des interactions entre différentes échelles) ou pratique (incertitude sur les données comme l'albédo de surface ou l'état initial des modèles climatiques, qualité de la représentation de certains processus locaux comme l'évaporation de surface ou la formation des nuages, arbitrage entre d'un côté complexité numérique du modèle et degré d'incertitude de sa description et de l'autre temps de résolution). On est donc renvoyé à une cascade de modèles avec deux sources d'incertitude quand on s'approche des petites échelles:

- la propagation de l'amont vers l'aval au long de la cascade de modèles utilisés des incertitudes liées à chaque maillon : par exemple les incertitudes sur les projections régionales du climat et sur les scénarios socio-économiques par pays ou groupes de pays se répercutent en incertitudes sur les impacts résultants à l'échelle régionale,
- les incertitudes spécifiquement liées aux difficultés inhérentes aux exercices de désagrégation et d'agrégation des variables à l'interface entre modèles, exercices qui sont nécessaires pour transmettre des informations entre des modèles conçus pour des échelles spatiales (et temporelles) très hétérogènes.

Nous avons déjà identifié au chapitre I à propos des sources d'incertitudes dans les évaluations des impacts et des dommages régionaux un certain nombre d'éléments repris dans le premier point : à savoir les incertitudes résultant du transfert des modèles, des données et des estimations d'une région à une autre (typiquement, de l'OCDE vers les pays en développement) et les difficultés de modélisation de la petite échelle (prise en compte dans les modèles climatiques des formes du relief, désagrégation par régions ou par catégories de revenu dans les modèles macro-économiques nationaux).

Le dernier point insiste sur les différences d'échelle entre modèles qui peut conduire à l'omission de variables importantes à petite échelle (par exemple, compte tenu de la taille de leur maille, les GCMs rendent pour le moment mal compte des modifications potentielles des

événements météorologiques extrêmes en fréquence ou en intensité), et être une source d'incertitude supplémentaire associée aux processus de navigation entre échelles.

Pour contourner cette difficulté, un effort de recherche significatif a été entrepris pour établir des modes de désagrégation des sorties climatiques à des échelles spatiales plus fines, soit à partir de méthodes statistiques (c'est le cas du modèle IMAGE¹³), soit à partir de modèles climatiques régionaux à haute résolution (qui sont forcés aux bornes par les résultats des GCMs). C'est d'ailleurs l'un des objectifs du programme de recherche européen PRUDENCE que d'affiner les projections du climat à l'échelle régionale (sur l'Europe) et de comparer les différentes méthodes et de qualifier les incertitudes. Mais ces procédures ajoutent une part supplémentaire d'incertitude et comme le souligne Mike Hulme [*Hulme et Carter, 1999*] "what has rarely been attempted is a demonstration of the added-value in terms of improved description of climate change impacts in the context of other sources of uncertainty and in terms of information that is useful for policy-makers".

Ce problème de multiplicité des niveaux d'agrégation pose une difficulté supplémentaire liée à la signification des variables échangées. A ce titre, [*Katz, 1999*] rappelle que dans certains cas, ce qu'en statistique on appelle le support d'un modèle (ou des données) n'est pas clair : par exemple, jusqu'à récemment, la question de la signification exacte d'un point de grille de GCM (véritable point physique ou moyenne sur la maille) n'était pas tranchée [*Skelly et Henderson-Sellers, 1996*]. La même question en économie sur la signification des moyennes et des procédures d'agrégation peut se poser : s'agit-il d'un consommateur moyen, d'un consommateur représentatif ? quelles sont les pondérations utilisées pour l'agrégation (par exemple des dommages) ?

On retrouve dans la typologie que nous venons de présenter la tension entre l'incertitude théorique, qui renvoie à une méconnaissance, complète ou partielle, dans la perception, la compréhension et la représentation des phénomènes étudiés, et l'incertitude pratique, qui renvoie aux difficultés de quantification des éléments explicatifs contenus dans une théorie. Quelle que soit la manière d'aborder la question de l'incertitude du changement climatique, cette distinction reste un invariant : c'est par exemple le critère proposé par [*Morgan et Henrion, 1990*] qui suggèrent de classer l'incertitude selon qu'il s'agit de l'incertitude sur les quantités et les variables dans les modèles quantitatifs d'analyse du risque et d'aide à la décision ou de l'incertitude sur la forme même de ces modèles, ou la distinction opérée par [*Funtowicz et Ravetz, 1990*] entre les incertitudes épistémologiques (différences de perception et d'analyse des phénomènes) et les incertitudes techniques (problèmes des mesures et des données) et méthodologiques (choix des outils de modélisation). Cette catégorisation s'avère pertinente pour évaluer l'origine des incertitudes et leur contribution respective sur les résultats ou identifier les moyens de les réduire. Elle se place cependant dans une perspective heuristique (comment les propriétés du système - sa complexité - peuvent donner naissance à différents

¹³ Dans le modèle IMAGE 2.2 [2001] en effet, le module climatique est particulièrement simple: il comporte ainsi cinq compartiments qui représentent l'atmosphère, deux surfaces continentales et deux océans (la différenciation des terres et de l'océan rend compte des particularités des deux hémisphères). A ce module de très faible résolution - qui est en charge des projections du climat à l'échelle globale - est greffé un système d'interpolation pour rapprocher la structure de la réponse obtenue de celle des différents modèles climatiques puis obtenir une réponse climatique à fine échelle (0,5° soit près de 50 km). [*Le Treut et Serafini, 2002*] rappellent que cette approche de modélisation présente deux inconvénients : a) la réponse climatique est extrêmement linéaire (privée de toute fluctuation du climat qui serait l'équivalent des fluctuations naturelles), b) elle est naturellement dépendante des modèles climatiques qui servent de référence pour la procédure d'interpolation.

types d'incertitude) et il est utile de la compléter par une présentation des incertitudes spécifiquement liées aux exercices de modélisation.

I.2. Incertitude et modélisation intégrée du changement climatique : la modélisation comme source d'incertitudes

En effet, l'analyse du changement climatique peut difficilement ne pas recourir aux modèles pour représenter ce système dans toute sa complexité. Cela est d'autant plus nécessaire que le changement climatique étant une expérience unique à long-terme, notre connaissance reste tributaire des activités de modélisation. Ainsi, qu'il s'agisse des modèles à visée cognitive (de petits modèles conceptuels qui permettent d'analyser la nature et l'importance relative des rétroactions entre changement climatique et cycle du carbone, par exemple), des modèles employés pour reconstruire des séries de données et les traiter pour leur utilisation ou des modèles à visée prédictive (les GCMs, les grands modèles intégrés), les modèles sont très présents pour cerner les enjeux du changement climatique et identifier leurs implications pour la décision. C'est pourquoi nous présentons une typologie rapide des sources d'incertitude spécialement liée aux modèles. Cette taxonomie permet d'identifier au moins quatre sources d'incertitude qui procèdent des activités de modélisation. Nous présentons en parallèle certaines des méthodes utilisées pour évaluer la contribution de chacune de ces incertitudes spécifiques sur le résultat final du modèle.

I.2.1. Multiplicité des représentations du monde, multiplicité des modèles

Le premier niveau insiste sur la très grande diversité des modèles existants, qui reflète les différentes options retenues par leurs concepteurs, tant pour des raisons pratiques (temps de calcul, « astuces » de modélisation pour contourner des difficultés numériques de résolution, adaptation au cas du changement climatique de modèles existants¹⁴) que davantage théoriques (choix de focaliser le modèle sur tel ou tel aspect, référence à des paradigmes théoriques différents).

Si bien sûr cette diversité est nécessaire pour représenter la pluralité des interprétations des phénomènes et permet d'évaluer la pertinence de tel ou tel modèle pour analyser un mécanisme donné, elle introduit néanmoins une incertitude sur les *choix de modélisation* pour qui cherche à dégager une vision cohérente à partir de faits saillants tirés des résultats des modèles. On peut en particulier identifier trois sources d'incertitude, liées aux formes mathématiques utilisées et à la complexité des modèles.

Une première difficulté provient de la sélection des formes mathématiques retenues pour décrire les relations entre les différentes variables : c'est un choix technique déterminant puisqu'il définit comment évoluent ces relations quand on s'écarte des conditions qui ont servi au calibrage. Or [Dowlatabadi, 1999] rappelle que des propriétés mathématiques (continuité, différentiabilité, convexité) jouent bien souvent le rôle d'une « main invisible » pour guider nos choix, qu'il s'agisse d'un exercice de modélisation analytique ou numérique. Pourtant, les formes mathématiques retenues peuvent finalement être extrêmement restrictives pour refléter

¹⁴ Ainsi, le modèle *EPPA* du MIT se place dans la continuité directe du modèle *GREEN* de l'OCDE.

les propriétés des systèmes en question. C'est typiquement le cas pour les fonctions de dommages ou d'impact, calibrées autour d'un point très incertain, qui dictent comment varient les dommages quand on s'éloigne des scénarios de référence utilisés pour leur estimation ; de même, les valeurs des élasticités de substitution pour les fonctions d'utilité ou les fonctions de production qui sont estimées pour des conditions locales mais qui sont généralisées à l'ensemble de définition de ces fonctions.

Une deuxième source d'incertitude (et d'hétérogénéité des modèles) provient de l'adoption d'un paradigme pour construire le modèle. Ce choix n'est pas neutre pour la conception du modèle (les points qu'il permet d'étudier plus spécialement, la nature des relations utilisées, sa complexité) et influence dans une certaine mesure les résultats de l'analyse (et dès lors l'interprétation qui en est faite). C'est par exemple le cas de la modélisation du secteur énergétique et de ses liens avec l'activité économique : selon que l'on suit les visions, optimistes, de l'ingénieur (approche *bottom-up*) et ou celles, pessimistes, du macro-économiste (approche *top-down*), c'est une taxe carbone relativement faible (pouvant même induire un bénéfice social net) ou au contraire une taxe beaucoup plus importante (impliquant, elle, des coûts significatifs) que l'on retiendra pour atteindre un objectif environnemental [Baron et Hourcade, 1994].

De même, à la suite de [Dowlatabadi, 1999], on peut rappeler que se placer dans une perspective centrée sur l'économie du bien-être ou au contraire l'écologie descriptive implique des choix de modélisation radicalement différents. D'un côté, les modèles privilégieront la description des phénomènes économiques suivant un cadrage théorique robuste (comme les modèles de croissance optimale dont les propriétés dynamiques sont bien connues) tandis que la représentation des phénomènes naturels est réduite à un petit nombre d'équations mettant en jeu les quelques paramètres et relations cruciaux. Ici, les difficultés proviennent de l'internalisation des processus naturels dans le modèle économique (définition des fonctions d'impact et d'utilité à l'interface économie/environnement, valorisation des ressources naturelles et du monde vivant). Ce sont les modèles intégrés de recherche de politique climatique optimale, comme *DICE*, *RICE*, *STARTS* ou *DIAM*. De l'autre, les activités humaines sont représentées comme des processus au sein des autres dynamiques des systèmes naturels et les difficultés proviennent là de l'absence de considérations économiques (comme les prix ou les anticipations) qui représenteraient, même imparfaitement, les comportements humains et structureraient l'évolution inter-temporelle du système. Dès lors, le risque est grand d'observer lors de la simulation des comportements de type *overshoot and collapse* ([Manne et Rutherford, 1994], p. 59). C'est l'exemple du modèle *IMAGE* [Alcamo et al., 1998], qui se place dans la filiation du modèle *World3* ([Forrester, 1971; Meadows et al., 1972]) dont on a pu reconnaître plus haut certains éléments critiques avancés par Nordhaus ([Nordhaus, 1973; Nordhaus et Tobin, 1973]).

Une troisième source de difficulté provient, compte tenu des contraintes numériques posées par la complexité du problème et son temps de résolution, de la définition des pas de temps des différents phénomènes modélisés et des échelles spatiales. Par exemple, le pas de temps du modèle *DICE* [Nordhaus, 1994b] est de dix ans. Tous les processus, socio-économiques comme naturels, sont ainsi rapportés à cette durée, qui peut être jugée un peu longue pour décrire le cycle du carbone¹⁵. De même, l'articulation entre les mécanismes de grande échelle du climat et les mécanismes de petite échelle : les mailles des modèles climatiques (50 km de

¹⁵ Dans la pratique, les équations du cycle du carbone du modèle *DICE* ont d'abord été calibrées pour des pas de temps annuels à partir de données issues de modèles développés du cycle du carbone. Les résultats de ce premier calibrage ont servi à recréer des jeux de données mis en forme pour servir de base au calibrage des équations du cycle du carbone sur un pas décennal.

côté maintenant) qui sont des objets homogènes ne sont pas l'échelle pertinente pour décrire des phénomènes comme la formation des nuages et leur localisation verticale et horizontale ou les liens entre climat et relief (la très grande variabilité des zones montagneuses).

Pour les modèles climatiques, on peut dire que les GCMs sont semblables à leurs paramétrisations près : autant les processus de grande échelle suivent des lois physiques bien établies (comme l'équation de Navier-Stokes), qui apportent une certaine unité conceptuelle aux modèles climatiques, et leur représentation diffère peu d'un modèle à l'autre, autant la physique des processus à l'intérieur des mailles n'est pas maîtrisée et fait l'objet de paramétrisations différentes (la représentation des nuages, par exemple).

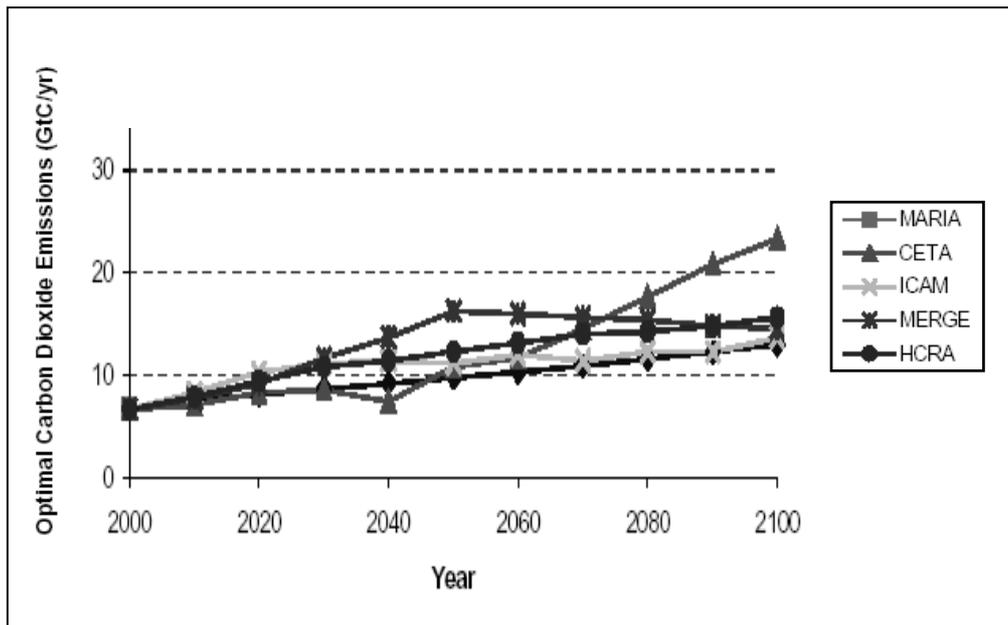


Figure II-6. Incertitude liée aux choix de modélisation : trajectoires d'émissions de GES optimales pour cinq modèles intégrés, calibrés sur un même jeu de données.

Source : [Yohe, 2002].

Du côté des modèles économiques, un bon exemple des interactions entre incertitude liée aux choix de modélisation et décision peut être avancé en comparant les trajectoires d'émission de référence obtenues par cinq modèles lors d'une expérience conduite par l'Energy Modelling Forum (EMF) en 1996. A cette fin, ces cinq modèles ont été calibrés sur le même jeu de données mais ils donnent sans surprise des résultats différents car ils diffèrent de manière significative quant aux approches retenues, aux questions auxquelles ils sont sensées répondre et aux visions du monde de leurs concepteurs. Ainsi, le modèle *HCRA* [Hamnitt et al., 1992] s'appuie sur une description agrégée et *top-down* de l'activité économique et du secteur énergétique, en mettant l'accent sur les différences des coûts de réduction des émissions de GES selon qu'il s'agit de mesures d'économie d'énergie (jeu sur l'intensité énergétique) ou d'une refonte des systèmes énergétiques (jeu sur le capital productif). Les modèles *CETA* [Peck et Teisberg, 1992, 1995], *MARIA* [Mori, 2000; Mori et Takahashi, 1999] et *MERGE* [Manne et Richels, 1992], en revanche, incluent une description beaucoup plus détaillée du secteur énergétique. Quant au modèle *ICAM* [Dowlatabadi et Morgan, 1995], il est beaucoup plus désagrégé, incorporant de multiples détails sur les secteurs d'activité et les comportements des

ménages. Comme on peut le constater Figure II-6, les trajectoires d'émissions issues des différents modèles divergent notablement dès 2020.

Les inter-comparaisons de modèles comme les travaux entrepris sous l'égide de l'EMF ou les deux expériences CMIP en climatologie permettent d'approcher ce type d'incertitude. Les expériences sont conçues dans un cadre homogène (calibrage sur les mêmes données, EMF, ou augmentation exogène de la concentration atmosphérique de CO₂ au rythme de 1% par an, CMIP1) afin d'accéder à l'influence des formes de modélisation sur les résultats (choix des fonctions, niveau d'agrégation, pas de temps, équations, langage et algorithme de résolution). [Hordijk et al., 1999] qualifient ces méthodes d'analyses externes de l'incertitude puisque leur objectif est de tester la validité d'un modèle donné comme outil, ce qui requiert entre autres de le comparer à d'autres modèles, par opposition aux analyses internes dont l'objectif est de procéder à une évaluation qualitative et quantitative des sources d'incertitudes d'un modèle et de quantifier leur impact sur ses résultats, ce qui se fait à partir du seul modèle en question.

I.2.2. L'incertitude paramétrique

Le deuxième niveau introduit les incertitudes liées à l'estimation des paramètres des modèles : ce sont les incertitudes sur le *calibrage*, liées à cette étape de quantification et de transcription. On peut séparer l'incertitude sur les données elles-mêmes (protocole de mesure et saisie) et l'incertitude sur leur traitement statistique en vue de leur utilisation dans les modèles.

Une première composante concerne l'incertitude sur la mesure elle-même : le protocole de mesure ou l'enregistrement des données. Sur l'erreur de mesure, on peut citer le cas des données enregistrées par les satellites qu'il faut corriger d'une erreur liée à la décroissance de l'altitude des satellites au cours du temps et qui posent initialement des difficultés d'étalonnage et de traitement car les satellites ne mesurent pas directement la température à une altitude déterminée [Planton, 1999]. On rencontre également des erreurs liées à l'hétérogénéité des séries, par exemple l'hétérogénéité des observations météorologiques résultant des méthodes d'observations (changement d'appareillage) ou des conditions d'observations (effet de l'urbanisation). En comparant les données recueillies par les stations au sol et celles enregistrées par les ballons sondes et les satellites, [Kalnay et Cai, 2003] ont ainsi montré que la tendance au réchauffement sur les 50 dernières années observées aux Etats Unis (environ +0,13°C) était imputable pour une grande part aux effets de l'urbanisation et du changement d'usage des sols, effets qui avaient été sous-estimés jusqu'ici. Du côté des sciences humaines, on peut citer l'exemple des biais introduits dans les séries économiques par l'absence par nature des activités informelles qui conduit à sous-estimer la production, les échanges et les revenus des ménages, ou les grandes incertitudes associées aux données démographiques produites dans certains pays.

Une seconde composante concerne l'incertitude liée au traitement des séries de données pour les exploiter dans un modèle ou les diffuser dans une base de données : reconstruction des lacunes, filtrage quand les séries sont hétérogènes ou très bruitées. Dans ces opérations, on peut rencontrer deux types de difficultés :

- *des difficultés liées à l'échantillonnage*. Il y a par exemple très peu de points de mesure du carbone atmosphérique à la surface du globe (les mailles sont donc très grandes) et ils sont de surcroît répartis de manière très inégale : beaucoup plus dans l'hémisphère Nord que dans l'hémisphère Sud (le premier, très continental, étant

une source de carbone tandis que le second, majoritairement océanique, est davantage un puits), beaucoup plus sur les continents que sur les océans, absents ou presque absents de trois grandes régions (l'Amérique du Sud, l'Afrique et l'Asie) (cf. [Houghton et al., 2001], chap III, fig. 3.7). C'est également le cas pour les mesures des agrégats macro-économiques de certains pays en développement, où les données récentes sont absentes ou peu fiables.

- *et des difficultés liées à la reconstruction des données au moyen de modèles.* En effet, pour beaucoup des modèles des processus naturels, il n'y a pas systématiquement de mesures disponibles pour toutes les grandeurs mobilisées dans ces outils : par exemple, les mesures des flux de carbone entre la biosphère et l'atmosphère ou les températures passées (avant ces 150 dernières années où des mesures directes de la température, relativement fiables, commencent à manquer). Ces grandeurs sont ainsi estimées à l'aide d'une approche inverse à partir des modèles dans lesquels elles sont intégrées (c'est le cas pour évaluer les régions sources et les régions puits du cycle du carbone) ou à partir de *proxies* (c'est le cas du couple isotopique $^{16}\text{O}/^{18}\text{O}$ utilisé pour construire des séries de températures fossiles à partir des archives glaciaires ou sédimentaires). L'estimation de ces grandeurs reste donc tributaire des incertitudes liées aux modèles utilisés (comment ils décrivent les phénomènes) et des incertitudes sur les données qui ont servi à nourrir ces mêmes modèles.

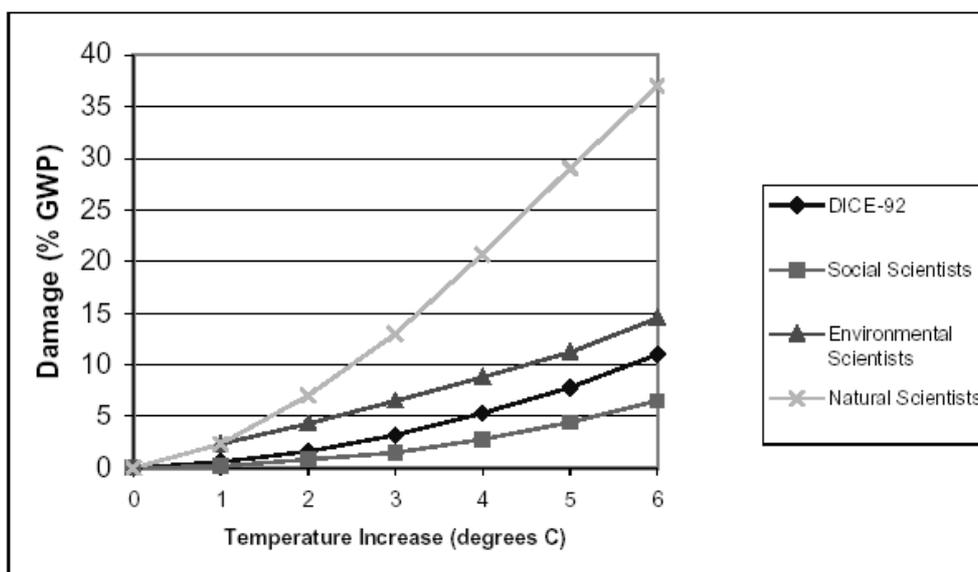


Figure II-7. Calibration des fonctions de dommages pour différentes croyances.

Pour être comparables à la fonction de dommages de DICE-92, les fonctions de dommages sont de la forme $\alpha(\Delta\theta)^\beta$, où α et β sont réels et $\Delta\theta$ représente l'amplitude du réchauffement moyen global. Elles sont calibrées à partir de l'estimation médiane pour chaque groupe d'experts des impacts d'un réchauffement de + 3°C et + 6°C en 2090. Source : [Roughgarden et Schneider, 1999].

Les travaux de [Roughgarden et Schneider, 1999] donnent une illustration plus générale de l'incertitude paramétrique. L'incertitude sur le calibrage porte ici sur la fonction de dommages et traduit les croyances entretenues sur ce point par différents groupes de la communauté scientifique, croyances qui ont été révélées par un sondage auprès d'experts conduit par

Nordhaus [Nordhaus, 1994a]. Ces fonctions de dommages sont représentées Figure II-7 : on peut y constater que la fonction de dommages de *DICE-92* [Nordhaus, 1992] est relativement semblable à celle des 'Sciences sociales' et correspond à une vision du monde beaucoup plus optimiste que 'l'Economie de l'environnement' et surtout 'les Sciences de l'Univers'.

La Figure II-8 présente les résultats obtenus avec *DICE-92* selon que l'on utilise l'une ou l'autre de ces fonctions et montre bien comment des perceptions très contrastées sur les dommages du changement climatique se traduisent par des opinions tranchées sur le timing (et le niveau d'effort) des politiques climatiques.

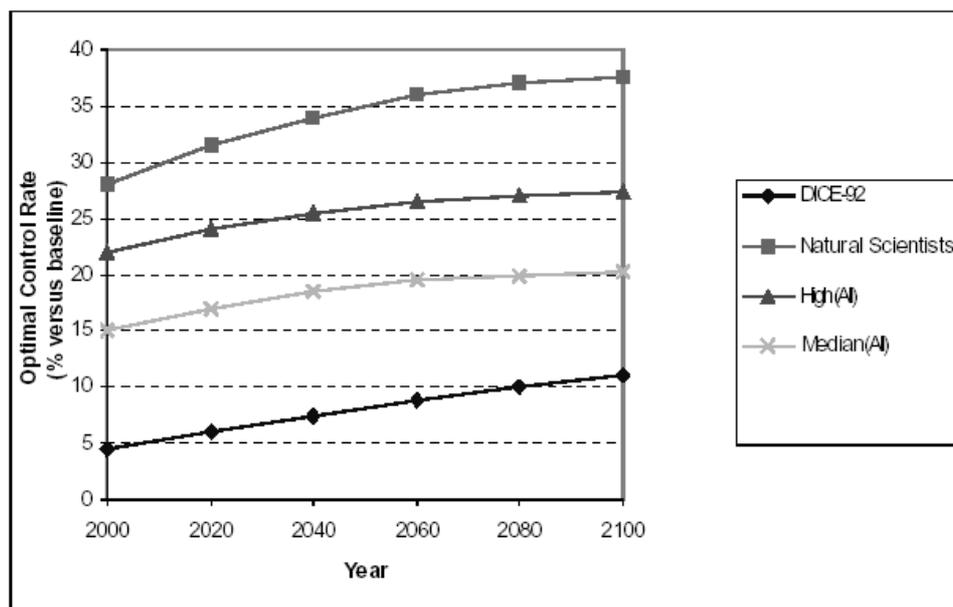


Figure II-8. Profils d'abatement optimal obtenus avec le modèle DICE-92 pour chacune des fonctions de dommages présentées à la Figure II-7.

Source : [Roughgarden et Schneider, 1999].

Pour quantifier ce type d'incertitude, on peut avoir recours aux outils d'analyse statistiques des données, qui permettent d'obtenir une mesure de l'erreur et des biais envisageables, ou quand mesures et observations font défaut, aux dires d'experts pour encadrer une variable ou un paramètre incertains voire, comme le sondage de Nordhaus ou celui de Morgan et Keith sur la sensibilité du climat [Morgan et Keith, 1995], proposer une distribution subjective pour le paramètre en question.

I.2.3. Propagation des incertitudes sur les résultats

Le troisième niveau traite de la répercussion des deux incertitudes précédentes sur les résultats du modèle, en particulier les variables de décision (le niveau d'abatement) ou certains indicateurs critiques de l'état du système (la température moyenne globale).

C'est typiquement à ce niveau qu'intervient l'analyse de sensibilité d'un modèle pour étudier l'influence des choix de modélisation, des paramétrisations retenues et du calibrage sur les résultats du modèle. Cependant, elle nous renseigne plus sur la sensibilité du modèle lui-même que sur notre capacité d'évaluer et de traiter l'incertitude en lien avec la décision. Plus précisément, [Kann, 1998] identifie deux limites importantes :

- si l'analyse de sensibilité permet d'accéder à l'influence d'un paramètre sur les résultats du modèle (paramètres clefs, mise en lumière de rétroactions déterminantes, aperçu de l'étendue des réalisations possibles du modèle en particulier les situations catastrophiques ou irréversibles), elle n'est qu'une première étape dans le traitement de l'incertitude. En particulier, elle n'étudie pas l'impact de la combinaison des incertitudes sur le résultat final.
- l'analyse de sensibilité, comme les autres méthodes d'analyse interne de l'incertitude, suppose d'abord que la structure du modèle est correcte. Elle ne permet donc pas de détecter et d'évaluer des erreurs liées à la spécification, ce qui est l'objet des méthodes externes (*cf supra*).

Les méthodes d'échantillonnage, quant à elles, permettent en revanche d'étudier comment l'incertitude sur les variables et les paramètres en entrée au modèle se propagent sur ses résultats, en permettant d'obtenir une approximation de la distribution des sorties du modèle. Une des difficultés centrales en est de proposer des distributions pour les variables et paramètres en entrée au modèle et d'évaluer leurs éventuelles corrélations.

Si de telles méthodes permettent de mieux étudier les caractéristiques du modèle vis à vis de l'incertitude que les analyses de sensibilité, une de leurs limites importantes est qu'elles ne nous renseignent en rien sur la prise de décision en présence d'incertitude¹⁶. En effet dans chacune des simulations, le modèle tourne pour un jeu de paramètres donnés ; il n'y a donc pas d'articulation entre décision et pondération des différents états du monde. Par exemple, pour comparer l'avantage relatif face à l'incertitude d'une taxe carbone ou d'un quota global, [Pizer, 1999] effectue une analyse de type Monte Carlo sur le modèle *DICE* pour 13 paramètres incertains. Pour analyser ses résultats, Pizer fait l'hypothèse que la politique optimale en présence d'incertitude correspond à l'espérance de toutes les trajectoires obtenues au terme de l'analyse de Monte Carlo ; ce qui n'est pas acceptable compte tenu des nombreuses relations non-linéaires à l'intérieur du modèle *DICE*, sans parler de l'aversion au risque.

I.2.4. L'incertitude au futur

Le quatrième niveau insiste sur les incertitudes à propos de l'évolution que pourraient suivre les déterminants du modèle : par exemple, les profils d'émissions des GES, l'évolution démographique, *etc.* C'est ainsi une incertitude sur le futur.

Une manière de traiter cette incertitude est de suivre une approche par scénario, à l'image des scénarios SRES qui servent de base aux exercices prospectifs de la communauté. C'est la manière la plus simple car elle reste déterministe dans sa façon d'aborder le problème tout en permettant d'approcher des incertitudes multiples. Ces scénarios sont un jeu d'images alternatives du futur, élaborées à partir de dires d'experts - que l'on espère représenter

¹⁶ Ce point ne vaut bien sûr que pour des modèles où est représenté un processus de décision.

l'étendue des futurs envisageables ; leur construction n'est pas sans elle-même présenter de multiples sources d'incertitude, dont l'étape du choix des histoires narratives et l'étape de traduction quantitative de ces hypothèses, où l'on s'efforce de maintenir une relative cohérence aux scénarios (évolution démographique/dynamique économique et structure des activités/profils des émissions) ([Nakicenovic, 2000], chap. I).

L'approche par scénario présente l'avantage qu'elle permet d'une manière relativement simple de traiter de nombreuses incertitudes et de les communiquer. En outre, les scénarios sont de précieuses sources de données pour pratiquer des comparaisons de modèles qui les utilisent comme jeux de référence.

L'inconvénient majeur de l'approche par scénario vient qu'elle ne nous renseigne aucunement sur l'origine des incertitudes, leur quantification et leurs implications pour la décision. Autrement dit, comme l'analyse de sensibilité, l'utilisation de scénario n'est pas un substitut à une analyse de l'incertitude, elle en est un premier pas.

En particulier, aucune probabilité ni aucune vraisemblance n'est par exemple associée aux scénarios SRES. Ce point a été l'occasion d'une controverse importante lors de leur élaboration. Tandis que le rapport des SRES indique "*Preferences for the scenarios presented here vary among users. No judgment is offered in this report as to the preference for any of the scenarios*" ([Nakicenovic, 2000], SPM) et "*There is no single, likely 'central' or 'best-guess' scenario either with respect to other SRES scenarios or to the underlying scenario literature. Probabilities or likelihoods are not assigned to individual SRES scenarios*" ([Nakicenovic, 2000], encadré TS 5), Stephen Schneider, de l'Université de Stanford, avait instamment demandé aux équipes, malgré leur réticence à se lancer dans un tel exercice compte tenu des gigantesques incertitudes en présence, de procéder à une évaluation de la vraisemblance des scénarios pour éviter que les utilisateurs ne s'y emploient de manière même implicite ou choisissent de manière arbitraire les scénarios – déclarés "*equally sound*" - de manière à obtenir des résultats qui leur soient le plus favorables [Schneider, 2001, 2002]. En l'absence d'une telle évaluation, le rapport des SRES recommande "*that a range of SRES scenarios from more than one family be used in any analysis*" ([Nakicenovic, 2000], encadré TS 5) pour refléter en partie les incertitudes. Des tentatives d'évaluation ont cependant été entreprises à l'aide des probabilités imprécises [Ha Duong, 2003].

Au terme de cette présentation des incertitudes du changement climatique, qui s'appuie sur les très nombreuses typologies disponibles¹⁷, on peut se rendre compte que l'incertitude résulte de la combinaison d'incertitudes de nature très différente : l'état d'avancée des connaissances et leur traduction dans les modèles (lacunes, plusieurs explications des phénomènes en compétition, biais structurel), des difficultés liées à la qualité des données et à des contraintes numériques, la propagation des incertitudes au sein des modèles de l'évaluation intégrée et la difficulté d'évaluer et représenter les multiples liaisons entre les sous-systèmes, et la non réductibilité du système étudié à un ensemble de processus déterministes.

¹⁷ Cf. par exemple les 7 taxonomies recensées par [Hordijk et al., 1999]. Leur variété s'explique par les différentes appartenances disciplinaires de leurs auteurs -épistémologie, mathématiques, science du climat, économie, nombreuses disciplines des impacts- et leur degré de familiarité avec les enjeux de la modélisation intégrée dans ce domaine.

C'est précisément la fonction de ces typologies de l'incertitude que d'en clarifier l'origine, notamment pour les méthodes d'analyse les plus appropriées- dont nous avons présenté les plus courantes. Analyser l'incertitude, c'est à dire :

- cerner l'incertitude dans sa contribution aux résultats des modèles : étudier les liens entre les entrées et les sorties du modèle - c'est à dire comment se propage l'incertitude ; identifier les variables et paramètres dont l'incertitude est des plus importantes sur les résultats - c'est à dire hiérarchiser l'incertitude ; et tenter de déterminer parmi ces éléments lesquels sont les plus incertains et les moins prédictibles et envisager les moyens de réduire ces incertitudes (avancée de la connaissance, plus de données, plus de puissance de calcul, raffinement des modèles).
- éclairer les décideurs sur les choix en présence d'incertitude : communiquer les informations scientifiques sous une forme compréhensible et exploitable¹⁸ ; aider à identifier les stratégies robustes en présence d'incertitude ; et suggérer des orientations de recherche de manière à réduire ces incertitudes.

Les deux typologies que nous venons de présenter se concluent principalement sur les limites de notre capacité prédictive à long-terme. De grandes plages d'incertitude subsistent dans notre connaissance du comportement de la machine climatique, de la dynamique des écosystèmes, de l'avenir des sociétés. Nous avons en particulier attiré l'attention sur le fait que l'ensemble des états du système à l'étude ne nous étaient pas encore connus et qu'en son sein, les multiples connexions et boucles de rétroaction étaient une des clefs de la compréhension de sa dynamique. Enfin, ces deux typologies rappellent qu'il reste une part d'incertitude non réductible dans nos projections de long-terme : même en présence d'un modèle absolument complet et d'une puissance de calcul illimitée, les sentiers de développement économique, les profils des sociétés humaines et les images régionales du climat à la fin du XXI^{ème} siècle ne sont pas uniques.

Ces conclusions nous invitent à réfléchir sur le statut des modèles, qui sont dans ce domaine un outil essentiel. Conscient de toutes les limites et des incertitudes associées aux exercices de modélisation intégrée du changement climatique, [Dowlatabadi, 1999] rappelle que chaque simulation est au mieux '*an internally consistent projection of a plausible future*' et il insiste sur la nécessité de rendre explicites les incertitudes au moment de communiquer les résultats des modèles. C'est à dire que les exercices de modélisation en ce domaine n'ont pas, comme le modèle du pendule idéal, de dimension prédictive mais une dimension cognitive, pour participer aux progrès de nos connaissances d'un système aussi complexe et explorer des futurs possibles en s'efforçant de leur maintenir la plus grande cohérence possible.

¹⁸ C'est à cette tâche que ce sont attelés Stephen Schneider et Richard Moss en proposant différentes méthodes pour communiquer sur les incertitudes des conclusions du rapport du GIEC, communiquer en dehors de la communauté scientifique vers les décideurs et même entre différentes disciplines pour unifier les pratiques sur ce point. En témoignent leurs propositions de présentation des incertitudes, présentées lors des rencontres pour la préparation du troisième rapport du GIEC [Moss et Schneider, 2000]. Conscients de la difficulté d'évaluer des distributions de probabilités pour un domaine aussi incertain que le changement climatique mais en même temps conscients de la nécessité d'organiser l'information sur l'incertitude pour la rendre exploitable au mieux par les négociateurs et les décideurs, Moss et Schneider ont proposé que les experts du GIEC qualifient leurs résultats selon des intervalles de confiance, les communiquent sous forme qualitative à l'aide de diagrammes en rayon (comprenant quatre dimensions : incertitude théorique, niveau de consensus, qualité des données et observations et divergence des modèles), etc . Ces recommandations, pour rendre plus rigoureuse la communication des incertitudes et aider les lecteurs du rapport à en comprendre les enjeux, n'ont pas été unanimement suivies par tous les groupes de travail du GIEC, notamment le troisième [Giles, 2002].

En particulier, on doit se prévenir contre l'illusoire précision des sorties des modèles¹⁹. L'utilisateur non averti pourrait être en effet hypnotisé par l'extrême complexité d'un modèle (niveau de désagrégation géographique, nombre important des secteurs pour représenter les activités économiques, raffinement de la représentation du climat et des impacts, *etc.*) et la prendre comme une garantie que les incertitudes sont relativement réduites puisque ce modèle semble exhaustif dans l'étendue de sa description des mécanismes du changement climatique. Le modèle *IMAGE* en est un bon exemple, avec des résultats déterministes sur le changement climatique en 2100 et l'étendue de ses impacts sur la biodiversité, les productions agricoles, la sécurité alimentaire, résultats diffusés sous forme de cartes, d'une maille de 0,5°. Plus d'un aura l'impression qu'un tel modèle produit une information précise, fiable et exploitable. Pour autant, son extrême complexité rend d'autant plus difficile l'analyse du modèle et le traitement de l'incertitude (quelle est son origine ?, son influence sur les résultats est-elle quantifiable ?) et ses résultats sont difficilement contrôlables. Dès lors, sous leur apparente fiabilité technique, de telles informations restent très fragiles et n'aideront pas beaucoup un décideur.

Ainsi, quelles difficultés rencontrent les décideurs et les négociateurs pour aborder ce dossier ? Compte tenu des gigantesques marges d'incertitudes en présence, sommes-nous dans une situation d'indécidabilité, avec le danger supplémentaire que chacun trouve une justification à ses positions vis à vis du risque climatique dans ce vivier de connaissances scientifiques et techniques encore peu fiables ? Au contraire, est-il possible d'organiser ces informations de manière à éclairer négociateurs, décideurs et citoyens et parvenir à un accord sur le contenu à court-terme des politiques climatique malgré tout ? Si oui, quel cadre d'analyse semble le plus à même d'y parvenir ?

II. Incertitudes et controverses du changement climatique

L'objectif de cette section est d'exposer comment l'incertitude sur le long-terme, en alimentant des croyances divergentes sur les perspectives de croissance, de développement des régions les plus pauvres, sur les impacts du changement climatique et sur les potentiels d'adaptation, sur les coûts de transformation des systèmes énergétiques des sociétés futures, participe à nourrir des controverses sur la légitimité et le contenu d'une action collective face aux menaces du changement climatique. En effet, parce que la Convention Climat ne trace pas de lignes directrices suffisamment fortes²⁰, le risque est grand soit de voir la négociation climat s'enfermer dans une série de controverses sans fin entre tenants de l'attentisme et partisans de l'action immédiate, aboutissant à une paralysie de l'action, soit de voir l'emporter les acteurs disposant de la rhétorique la plus séduisante, concluant au détriment de l'intérêt collectif à une action inappropriée.

¹⁹ Ce qu'exprime non sans humour Alfred Sauvy en déclarant : « Dans toute statistique, l'inexactitude du nombre est compensée par la précision des décimales ».

²⁰ Si l'objectif de la Convention esquisse ce que signifie une perturbation anthropique dangereuse du système climatique en désignant plusieurs types de menaces (biodiversité, sécurité alimentaire, sentiers de développement non soutenables), il s'abstient de fixer quel est le niveau *souhaitable* de stabilisation des concentrations atmosphériques des GES et en même temps, de définir des trajectoires d'inflexion des émissions pour satisfaire cet objectif de long-terme.

Pour comprendre comment la décision de court-terme est effectivement en péril nous proposons d'examiner les caractéristiques du risque climatique en suivant la classification des risques environnementaux globaux établie par le WBGU (*German scientific advisory council on global change*) [WBGU, 1999], dont nous retiendrons pour l'instant les critères suivants²¹ : les probabilités d'occurrence, l'étendue des dommages et les estimations des coûts de prévention (adaptation et mitigation), la qualité et la confiance que l'on peut placer dans ces évaluations, le potentiel de mobilisation de l'opinion et les aspects distributifs. Nous allons ainsi voir que d'une part, nous ne connaissons pas l'ensemble des états du monde possibles (non seulement, les différentes configurations du climat et de leurs impacts mais aussi la manière dont elles sont et seront évaluées par les populations) et d'autre part, nous ne pouvons pas produire de distribution de probabilités objectives. Deux caractéristiques essentielles de l'aléa nous manquent donc. [WBGU, 1999] qualifient ainsi ce type de risque de *Pythia risk*, en faisant allusion à l'extrême ambiguïté des prophéties de la devineresse, qui peuvent prêter à toutes sortes d'interprétations. Nous allons nous intéresser à ces deux caractéristiques en commençant par la seconde.

II.1. Un futur non probabilisable : à quelle information sur l'aléa peut-on recourir pour décider ?

On ne peut assigner de probabilités objectives aux états du monde futur (profil du système énergétique, amplitude du réchauffement, etc.) car notre connaissance du système est encore trop imparfaite (incomplétude de la description), car il s'agit d'un système très complexe et nous ne pouvons pas produire pour chaque paramètre et chaque relation une distribution objective et fiable de probabilités, car enfin la nature non déterministe de ce système ne permet pas quadriller systématiquement tous les futurs possibles.

Un point important est ici que les états du monde futur (les coûts de réduction des émissions, l'amplitude du changement climatique et l'étendue de ses impacts) dépendent des politiques engagées (développement de la R&D dans le domaine des renouvelables, choix d'aménagement du territoire) : il n'y a pas indépendance entre les actions et les probabilités d'occurrence des états du monde. Autrement dit, on se trouve dans une situation de risque endogène, ce qui complique singulièrement (s'il était possible), le calcul des probabilités.

Bien que conscients cette difficulté essentielle, certains chercheurs - comme Stephen Schneider, nous l'avons vu - insistent pour que la communauté scientifique s'efforce de produire des estimations même subjectives, communique ces résultats sous forme d'intervalle de confiance *etc.*, puisque c'est une nécessité pour les décideurs qui sinon sont particulièrement démunis n'ayant qu'une information peu exploitable. Stephen Schneider [Moss et Schneider, 2000] met en particulier en avant deux risques :

- que les utilisateurs des scénarios et des résultats des modèles émettent par eux-mêmes un jugement implicite sur leur vraisemblance, avec le danger que leur connaissance du dossier climat, plus faible que celle de la communauté scientifique, les conduisent à négliger certains aspects essentiels du problème, et que leur jugement ne soit pas indépendant d'autres considérations (attitude face au risque, demande sociale, place dans la négociation)

²¹ Cette typologie contient en outre trois autres critères : la présence d'éventuelles irréversibilités, l'effet de latence entre un événement et ses conséquences et l'effet de persistance, que nous ferons intervenir dans le chapitre suivant.

- que cette incertitude soit exploitée de manière stratégique, en choisissant les scénarios qui présentent les configurations les plus favorables pour justifier certaines décisions²².

Les menaces diffuses du changement climatique ne relèvent pas d'une catégorie de risque au sens où l'entend Knight, c'est à dire comme une situation où un individu est capable d'associer aux différents états du monde potentiels une distribution de probabilités déterminée soit de manière logique, c'est par exemple le schéma du lancer d'un dé non pipé ou du tirage dans une urne dont on connaît par avance le contenu, soit en faisant référence à l'expérience et à l'observation, c'est l'interprétation fréquentielle des probabilités. Selon la distinction opérée par Knight, le changement climatique relève donc d'une situation d'incertitude. On se trouve donc ici comme le turfiste au moment de sceller ses paris. Il ne lui est effectivement pas possible de produire une distribution de probabilités objective de l'issue d'une course car il s'agit d'un événement trop complexe (où il y a toujours, heureusement, une part de surprise) et il ne possède pas toute l'information sur les états de la nature (santé des chevaux, *etc.*), qui ne sont d'ailleurs pas probabilisables. Ses paris reflètent donc davantage son attitude face à l'incertain et un certain degré de confiance, influencé par l'expérience (tel cheval est toujours gagnant, par exemple) et la rumeur.

Cependant, cette distinction entre risque et incertitude, pour aussi intéressante qu'elle soit d'un point de vue épistémologique, n'est pas forcément pertinente quand on adopte la place d'un décideur. Pour Hirshleifer et Riley [*Hirshleifer et Riley, 1992*], il ne se trouve en effet jamais dans une situation où les probabilités peuvent être considérées comme objectives, c'est à dire dans un univers de risque au sens de Knight : par exemple, les informations à sa disposition sur les défaillances techniques d'un avion ou d'accident nucléaire - dont il a besoin pour proposer des normes de sécurité - ne sont pas à proprement parler des probabilités mesurées (par des protocoles expérimentaux) mais correspondent à des estimations techniques.

Pour prendre une décision, il lui est pourtant nécessaire de représenter l'avenir et pour ce faire, il se fonde sur une distribution subjective de probabilités, formée à partir de son expérience, de rapports d'experts qui lui sont soumis, ... Le point important ici est la confiance qu'il place dans ses propres estimations et les anticipations qu'il forme sur l'espoir d'une amélioration de cette information. Ainsi, à la distinction fondamentalement statique entre risque et incertitude opérée par Knight, Hirshleifer et Riley substituent une distinction dynamique où la confiance et l'apprentissage jouent un rôle central. Les situations de risque sont caractérisées par une confiance élevée dans la distribution de probabilités formulée *a priori* (Hirshleifer et Riley proposent de les désigner par *hard probabilities*). Les situations d'incertitude sont, elles, caractérisées par une confiance faible dans la distribution anticipée, c'est à dire qu'il est fort probable qu'elle soit révisée (Hirshleifer et Riley proposent de les désigner par *soft probabilities*).

Ainsi, les schémas de décision dans l'incertain reposant sur des probabilités subjectives semblent pouvoir être appliqués dans le cas du changement climatique, l'analyse de Hirshleifer et Riley insistant en même temps sur la nécessité d'intégrer dans le cadre d'analyse de la décision l'éventualité d'un progrès des connaissances permettant une révision des croyances

²² Ainsi, Stephen Schneider [*Schneider, 2001*] montre comment en choisissant de représenter l'incertitude sur les scénarios d'émissions (les six marqueurs ou seulement le scénario le plus émetteur, A1F, et le moins émetteur, B1), on modifie singulièrement la probabilité (établie à partir des fréquences de résultats) que la température moyenne globale dépasse +3.5°C en 2100 : dans le premier cas, elle vaut 0,23 et 0,39 dans le second.

initiales du décideur. Une question centrale est de savoir, à partir des informations disponibles, quels mécanismes vont l'influencer dans la formulation de telles distribution de probabilités subjectives. En particulier, compte tenu des caractéristiques des menaces du changement climatiques (événement unique, impacts potentiels hors de l'expérience humaine, éventuelles irréversibilités, risque endogène, ambiguïté de l'information), beaucoup de facteurs vont agir sur les perceptions par chacun de l'aléa, introduisant tout spécialement une distorsion entre données objectives et vision subjective des probabilités d'occurrence. Dans le cas des accidents mortels, Kolstad [Kolstad, 2000] rappelle ainsi que les psychologues ont montré que les individus ont tendance à sur-estimer l'occurrence des événements de faible probabilité (accidents alimentaires avec le botulisme, ...) et à sous-estimer celle des événements à forte probabilité (accidents de la circulation, ...). Ce biais dépend également du fait que le risque est couru de manière volontaire ou pas (traverser la rue, fumer, ...) et que ses conséquences nous semblent plus ou moins importantes (immobilisation temporaire, handicap, mort, ...).

II.2. Une mer d'incertitudes, des croyances hétérogènes et volatiles

Au chapitre précédent, nous avons vu que pour le moment nous disposons d'un chiffrage très parcellaire, très incertain et très controversé des bénéfices des politiques climatiques. Nous allons examiner ici les conséquences du faible caractère opérationnel de ces évaluations sur la prise de décision et le processus de négociation, en nous intéressant en premier lieu au cycle de vie des politiques publiques puis en second lieu à la difficulté de réconcilier apparemment des vues divergentes sur les bénéfices des politiques climatiques à long-terme.

II.2.1. Une demande sociale mouvante face aux risques climatiques : fluctuations dans le cycle de vie des politiques publiques

Au chapitre précédent, nous avons souligné qu'une des limites fondamentales des évaluations des dommages disponibles tenait d'une part à la méconnaissance des impacts et d'autre part aux difficultés liées à leur valorisation. Rappelons rapidement certaines d'entre elles :

- La grande hétérogénéité des populations exposées et des niveaux de préoccupation : revenu et niveau de vie, préférences individuelles et préférences culturelles (en particulier en direction des écosystèmes et de certains paysages), impacts plus ou moins prononcés (menaces sur les aménités de la Nature et les *lifestyles* ou plus directement sur les conditions de subsistance même des populations - *human livelihood*), sachant qu'ils peuvent être réparables ou compensables ou au contraire irréversibles et catastrophiques ;
- Les difficultés supplémentaires, au-delà d'obtenir une mesure fiable des conséquences socio-économiques des impacts du changement climatique en univers certain, d'évaluer les primes de risques (et dans le cas d'impacts irréversibles, les valeurs d'option) associées à l'incertitude sur ces dommages et au degré d'aversion au risque des population exposées,
- Les différence des positionnements et des jugements de valeurs : entre une perspective anthropocentriste de la valeur de l'environnement comme pourvoyeur d'un certain nombre de biens essentiels (l'eau, la nourriture, les ressources

génétiques, etc.), d'un certain nombre de fonctions écologiques non remplaçables (la faculté d'épuration de certains milieux, la formation des sols, etc) et d'aménités culturelles et sociales, et une perspective plus universelle (en déplaçant le point de vue, si l'on accorde par exemple quelque reconnaissance à la conscience animale)²³ ;

- La difficulté de traduire les enjeux distributifs pour évaluer et comparer les dommages qui seront majoritairement supportés par les régions en développement en raison de tonnes de GES émises aujourd'hui dans les pays développés [Azar, 1999; Azar et Sterner, 1996].

Il convient de rajouter à ces difficultés que l'on rencontre classiquement avec la valorisation des actifs environnementaux et l'analyse coût-bénéfice, une difficulté supplémentaire liée à la volatilité des préférences individuelles (donc des consentements à payer et de la demande sociale), qui ne se forment pas par expérience directe du risque mais résultent de processus médiatiques qui impliquent la communauté scientifique et ses controverses, les mouvements d'opinion (ONG environnementalistes ou groupes de pression), les décideurs politiques et leur recherche d'effets d'annonce, la logique de mise en scène des mass-media.

En raison de la multiplicité des enjeux du changement climatique et de leur complexité, en raison des très grandes incertitudes de ce dossier, la société va se forger une perception d'un risque, qui échappe à l'expérience humaine, à partir des informations qui lui parviennent au travers de porte-paroles. Pour l'actualité récente en France, on peut penser par exemple à un certain nombre d'ouvrages²⁴, de qualité scientifique très diverse, aux émissions de télévision²⁵, ou aux très nombreux articles dans la presse et aux rubriques des émissions de radio où interviennent scientifiques, décideurs, ONG, industriels... C'est donc une information filtrée qui parvient au grand public et ceci n'est pas sans au moins deux dangers.

²³ Sur ce point, une des critiques qui est souvent adressée à l'analyse coût-bénéfice est qu'elle tend à sous-estimer la valeur de l'environnement et par là, conduit à valider des projets éventuellement non durables. [Goulder et Kennedy, 1997], parmi d'autres, souhaitent rappeler cependant que l'approche utilitariste (comme l'une des interprétations de l'approche anthropocentriste où les choses n'ont de la valeur qu'en tant qu'elles servent à l'accomplissement de certaines fins jugées favorables par l'homme) ne sacrifie pas systématiquement la Nature puisque dès lors qu'un individu affiche une préférence - même si elle n'est pas directement liée à l'usage (direct ou indirect) d'une ressource naturelle, comme la valeur d'existence par exemple -, cette préférence donne naissance à une valeur qui peut théoriquement être mesurée et prise en compte dans l'ACB. Les difficultés majeures ne résident donc pas dans la méthode mais dans sa mise en œuvre : quel est le degré d'information des individus concernés ?, comment intégrer les enjeux distributifs, en particulier quand les projets comportent des conséquences pour des communautés qui ne les ont pas elles-mêmes entrepris (générations futures et enjeux de soutenabilité, autres groupes et principe de compensation).

²⁴ Pour n'en citer que quelques uns, des plus scientifiques, *Qu'est-ce que l'effet de serre ?* par M. Petit (Vuibert, Paris, 2003), *Le changement climatique* de R. Kandel (PUF, coll. Que sais-je ?, Paris, 2002), *L'effet de serre* par H. Le Treut et J.-M. Jancovici (Flammarion, Paris, 2001), aux plus partisans comme *Effet de serre : le grand mensonge ?* par A. Fourçans (Le Seuil, Paris, 2002) ou *Climat de Panique : La vérité sur le réchauffement de la planète et ses conséquences* par Y. Lenoir (Favre Eds, Paris, 2001), sans parler de la controverse mondiale déclenchée par *The Skeptical environmentalist : measuring the Real State of the World* par B. Lomborg (Cambridge University Press, 2001).

²⁵ Ainsi récemment, l'émission *Climaction* (diffusée sur France 2 lundi 2 juin 2003) aux accents très grand public (on y présente un bulletin de météo fiction avec une France caniculaire en été 2080 ou des hivers glaciaires à la même période en raison de l'interruption de la circulation thermohaline dans l'Atlantique nord) ou la soirée Thema sur Arte, *Climat : on nous cache tout !* (diffusée mardi 10 juin 2003), de prétention beaucoup plus scientifique que la précédente mais très controversée dès le lendemain.

Le premier est celui de l'existence de groupes de pression

- qui récupèrent à leur compte dans ce vivier d'explications en concurrence les arguments qui leur sont le plus favorables et les imposent comme la vérité scientifique : on insistera par exemple sur les menaces catastrophiques que fait peser l'effet de serre - en sachant bien que même au conditionnel, elles frappent suffisamment l'opinion ; on attaquera au contraire sur la question de l'attribution du changement climatique observé au cours du XX^{ème} siècle et de son empreinte physique ou écologique (recul des glaciers, migration d'écosystèmes, changement dans la phénologie des espèces, etc.) pour nier la réalité du risque climatique et repousser la nécessité d'importantes réductions des émissions²⁶ ;
- ou qui, au contraire, exploitent l'incertitude, toujours pour servir leurs fins : on présentera le bilan coût avantage de l'effet de serre en omettant soigneusement l'incertitude sur les coûts mais en magnifiant l'incertitude sur les dommages²⁷ pour repousser la nécessité d'une action face au changement climatique²⁸.

A ce premier danger fait immédiatement écho un second danger : la naissance, relativement légitime dans ce contexte, d'un sentiment de doute dans le grand public qui en vient à considérer cette question avec une certaine suspicion ('Après tout cette affaire n'est-elle pas montée en épingle par des équipes de recherche désireuses d'augmenter leurs crédits ?'). Cette attitude peut trouver plusieurs explications :

- d'abord, le lien entre nos comportements et leurs conséquences n'est - pour ce qui concerne l'effet de serre - absolument pas tangible : à la différence de la pollution sonore immédiate à tous les sens du terme, par exemple, les conséquences de nos rejets de GES se feront sentir dans plusieurs décennies, ailleurs et notre contribution personnelle y est relativement marginale ;
- ensuite, l'extrême prudence des scientifiques à communiquer leurs résultats, la difficulté de faire passer une information construite sur un dossier aussi complexe et incertain (aucun scientifique n'acceptera que l'on attribue les désordres météorologiques récents à une perturbation des grands cycles naturels causée par l'homme, il insistera en revanche sur le fait que de tels événements seraient à attendre mais cette seconde proposition est bien peu médiatique) ;
- enfin, compte tenu des enjeux économiques, sociaux et géopolitiques de la question, la tentation d'y voir tout un faisceau de manipulations, d'intentions cachées et de phénomènes d'image de marque. Il en résulte donc un glissement de la nature du risque autour de son incertitude, que P. Roqueplo a qualifié de situation de risque

²⁶ Cf. par exemple les interventions récurrentes d'Y. Lenoir sur ce point, dont une des plus récentes est : 'Yves Lenoir : « Je m'étonne que la perspective d'un réchauffement soulève tant de crainte », sous-titre : 'Un spécialiste dénonce le discours catastrophique sur l'évolution du climat' (Le Figaro, 20 février 2003, p. 12).

²⁷ Ainsi, William Nordhaus : « *Why spend trillions of dollars to save billions ?* » ou « *A massive effort to slow climate change would be premature* » ; une conclusion de Conseil d'analyse économique de la Maison blanche : « *Global warming is not a threat to health or the economy. Plans to address it are* » ; citations en exergue de [Ayles, 2001].

²⁸ Cette argumentation qui repose sur l'effet paralysant de l'incertitude pour justifier l'inaction amène ainsi - parmi tant d'autres - Edward S. Sarachik, professeur de sciences de l'atmosphère à l'Université de Washington, à retourner la question : « *Policy makers have never told us how much we have to reduce uncertainty. At what point are we finished with the job?* » (Le Monde, supplément du NYT en date du 8-9 décembre 2002).

inversé [Roqueplo, 1988] : ce n'est plus tant le risque que l'on en vient à craindre que la manipulation stratégique de l'incertitude pour légitimer toutes sortes de positions à partir de l'exploitation des représentations de ce risque et des échos qu'elles peuvent réveiller dans l'opinion.

Mais surtout, dans un contexte où l'alerte est donnée mais où la communauté scientifique ne peut fournir pour le moment de réponse claire sur l'amplitude du changement climatique et ses causes, l'étendue de ses conséquences et les coûts des politiques de mitigation et d'adaptation, l'opinion va être particulièrement sensible au contenu de l'actualité (la succession de records de chaleur battus cette année, qui sont d'une certaine manière consacrés de manière scientifique (et donc indiscutable) par le communiqué de l'OMM comme quoi le mois de mai 2003 était le plus chaud depuis 1880²⁹, la canicule du mois d'août 2003, les séries d'inondations, les tempêtes, etc.) qu'elle sera tentée d'interpréter - non sans le relais des media - comme des manifestations visibles d'une dégradation chronique de l'environnement.

Plus précisément, on assiste à un décalage entre la progression réelle du phénomène et celle des préoccupations qu'il engendre, ce qui n'est pas sans conséquence pour la décision puisque la demande sociale est loin d'être systématiquement en phase avec et proportionnée à l'ampleur du risque. C'est ce que [Scimemi, 1987] a étudié en montrant que le cycle de vie politique des crises environnementales n'est que très peu corrélé avec le rythme réel des dégradations ou avec celui du progrès des connaissances. [Hourcade et al., 1992] constatent ainsi que la gestion des crises environnementales passe par deux phases successives : une phase de sous-concernement pendant laquelle la perception des risques est relativement faible et conduit à les sous-estimer et une phase de sur-concernement pendant laquelle un sentiment d'urgence entraîne de fortes pressions dans l'opinion pour des décisions immédiates et plus que symboliques alors que les solutions techniques ne sont pas encore bien définies. C'est l'exemple de la crise des pluies acides où à la suite de la médiatisation du phénomène et de son écho dans l'opinion, a émergé un sentiment d'urgence ; des décisions précipitées en matière de réglementation européenne sur les pots catalytiques ont alors été adoptées.

Tous ces points rappellent que pour le moment nous avons à disposition des évaluations des dommages bien peu opérationnelles pour éclairer un décideur : en particulier, en raison de la complexité et des très nombreuses incertitudes associées au dossier climat, la demande sociale à laquelle il souhaite répondre a de grandes chances d'être très éloignée des réalités des menaces du changement climatique et conduire par là à une action d'ampleur inappropriée face au risque.

II.2.2. Préférences et coordination : des croyances sur le long-terme inconciliables au blocage sur la décision de court-terme

La section sur les incertitudes du changement climatique se conclut sur l'impossible prédiction de long-terme. La formation d'une image de long-terme et la position à la table des négociations vont donc dépendre du degré de confiance dans l'avenir (est-on plutôt optimiste ou pessimiste sur l'ampleur des dommages du changement climatique et les potentiels techniques et sociaux

²⁹ "Global average land and sea surface temperatures in May 2003 were the second highest since records began in 1880. Considering land temperatures only, last May was the warmest on record" [OMM/WMO, 2003].

pour réduire les émissions et atténuer notre vulnérabilité), de l'attitude face au risque climatique (est-on très averse au risque ?), de la perception des intérêts personnels et de jugements de valeur.

Ainsi, [Lave et Dowlatabadi, 1993] ont étudié comment la coexistence de croyances différentes sur les bénéfices des politiques climatiques pouvait conduire à l'absence d'accord. Pour ce faire, ils comparent les bilans coûts-bénéfices attendus des décisions d'aujourd'hui, tels qu'ils résultent des visions du futur que peuvent construire divers acteurs à partir d'une même information sur l'ampleur du changement climatique. Ces croyances vont dépendre de la combinaison de perceptions portant sur l'étendue des conséquences socio-économiques d'un scénario de changement climatique donné et les coûts de réduction des émissions. Par exemple, s'il y a dans leur modèle un relatif niveau de consensus sur le fait qu'un réchauffement à l'échelle globale inférieur à +1°C en 2040 n'entraînerait pas de conséquences notables, l'ampleur estimée des dommages associés à un réchauffement compris entre +1°C et +5°C varie très fortement selon que l'on est optimiste, modéré ou pessimiste sur notre vulnérabilité économique et sociale et nos facultés d'adaptation. Compte tenu des incertitudes qui pèsent encore sur l'évaluation des impacts d'un changement climatique donné, les deux auteurs insistent d'ailleurs sur le fait que les chiffres utilisés dans leur étude peuvent aussi être interprétés comme des consentements à payer pour se protéger du risque climatique plutôt qu'une évaluation catégorique par catégorie des types d'impacts.

Le croisement de ces deux niveaux de perception (voir Tableau II-2) conduit à une typologie qui classe de part et d'autre de la catégorie des chercheurs impassibles, l'ensemble des visions du monde entre lesquelles un accord doit se faire préalablement à toute action :

- Les environnementalistes et les industriels occupent ainsi des positions exactement symétriques. Les premiers sont particulièrement préoccupés par les risques climatiques, dont ils envisagent systématiquement les pires réalisations, et tendent en même temps à être particulièrement optimistes sur les perspectives techniques et les coûts socio-économiques de réduction des émissions. Ils plaident donc pour des actions immédiates sans attendre qu'une meilleure connaissance des enjeux soit disponible et sont spontanément contrés par les seconds qui ne croient pas à la réalité des menaces et agitent le spectre de coûts disproportionnés.
- Le Dr Doom partage les craintes des environnementalistes sur les risques climatiques et le pessimisme technologique des industriels: ses craintes le poussent donc à agir mais son pessimisme sur les coûts le retient. A l'opposé, le Dr Pangloss ne suit pas la logique du pire : il y a, selon lui, de grandes chances que le changement climatique ne soit pas si dangereux que ça et dans le cas contraire, la technologie nous permettrait de sortir de l'impasse. Pour des raisons totalement différentes, il opte cependant pour des stratégies similaires à celle du Dr Doom.

Croyances sur les Coûts d'abattement	sur les Dommages		
	Optimiste	Modéré	Pessimiste
Optimiste	Dr Pangloss		Environne- -mentaliste
Modéré		Chercheur impassible	
Pessimiste	Industriel		Dr Doom

Tableau II-2. Croyances et positionnements pour l'évaluation des politiques climatiques.

Partant de cette classification, il est dès lors possible de calculer le bilan coût-bénéfice de chacun de ces groupes pour trois types de politique climatique : inaction, abattement modéré et réduction agressive. On aboutit bien évidemment à des décisions fort différentes qui semblent interdire l'éventualité d'une action commune : en adoptant le critère de l'utilité espérée comme règle de décision dans l'incertain, le Dr Pangloss, le chercheur impassible et le Dr Doom optent pour une action modérée tandis que les environnementaliste recommandent une réduction agressive des émissions et que les industriels jugent toute action immédiate inappropriée. Comme le note [Hourcade, 1997] : « Selon le poids de ces acteurs auprès des gouvernements, ces derniers vont alors exprimer sur la scène internationale des positions peu conciliables ».

Conclusion : Vers une décision séquentielle

Ainsi, l'incertitude sur l'étendue du changement climatique, l'ampleur de ses conséquences et les coûts de l'action semble bien être paralysante : d'une part, compte tenu des croyances divergentes sur les risques climatiques à long-terme, elle peut conduire à un blocage sur la question des ressources à allouer aujourd'hui pour lutter contre le changement climatique tandis que bien d'autres objectifs à plus court-terme pourraient sembler prioritaires ; d'autre part, en faisant du changement climatique tour à tour une crise imminente ou une chimère supplémentaire, elle peut conduire à opter pour une action sans mesure avec ce risque. Ainsi, le dossier climat comporte tous les éléments qui en font un exemple de décision en univers controversé, tel que défini par [Hourcade et al., 1992; Salles, 1993]: i) la communauté scientifique alerte gouvernements et opinion sur de potentiels risques environnementaux; ii) mais, dans l'immédiat, elle ne peut formuler autre chose que des éventualités, les incertitudes étant trop importantes pour identifier et mesurer les causes exactes et les conséquences des menaces possibles; iii) en même temps, les solutions techniques ne sont pas encore identifiées ou elles sont disponibles à des coûts prohibitifs.

D'une certaine manière, c'est donc autour de la question du temps que cristallisent tous les blocages : le temps de la nature et de l'économie (autrement dit la temporalité du changement climatique et du déploiement de ses impacts d'un côté, et le temps nécessaire à une refonte des systèmes énergétiques et à la mise en place de stratégies d'adaptation efficaces), le temps de la connaissance (à quel rythme se réduisent les incertitudes ?) et le temps de la décision (quelles options perdons-nous aujourd'hui en optant pour telle action ?). Par exemple, la controverse

sur le bien-fondé des engagements contenus dans le Protocole de Kyoto, c'est à dire la rationalité d'une action de court-terme en réponse à des risques de long-terme marqués par une incertitude très lourde, reprend, dans une vision partisane, chacun de ces éléments : en insistant sur la dichotomie entre action de court-terme et risque de long-terme, en insistant sur l'importance de l'arrivée de nouvelles informations, en insistant sur le risque d'irréversibilité environnementale ou d'investissements.

Pour dépasser cette aporie, il est nécessaire de replacer la question de l'évaluation des politiques climatiques dans la perspective de la décision séquentielle. Compte tenu de la multiplicité des futurs envisageables aujourd'hui, l'enjeu n'est pas de décider une fois pour toutes quelle est la trajectoire d'émissions à adopter jusqu'en 2100 voire au-delà, ce qui nous fait courir le risque d'ignorer des impacts irréversibles encore inconnus ou d'enclencher de manière prématurée une transformation prématurée du profil énergétique de nos sociétés, mais de choisir la décision qui maintienne le plus d'options ouvertes (tant du côté de l'environnement que des systèmes socio-techniques) de sorte que les décideurs de demain soient à même de choisir en meilleure connaissance de cause. C'est ce qu'expriment [Manne et Richels, 1992] : *"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 appears to be relatively insensitive to some of the most controversial long-term uncertainties in the greenhouse debate"*.

En donnant une place centrale au progrès des connaissances et à la flexibilité tant environnementale qu'économique et sociale, la problématique de la décision séquentielle peut servir de cadre à une interprétation du principe de précaution. C'est dans une certaine mesure le contenu du Principe de Précaution qui est construit autour de la temporalité de l'action et la temporalité de l'arrivée des connaissances (en particulier parce qu'il renverse la perspective usuelle et nous fait passer de la prévention d'un risque à une attitude de précaution dans l'attente de plus amples informations), et de la préférence pour la flexibilité (éviter l'irréversibilité climatique ou l'inaccessibilité à cause d'inerties naturelles qui sont les plus longues, éviter les coûts irrécouvrables des investissements dédiés). C'est ce que nous allons examiner au chapitre suivant avec l'exposé des outils économiques qui permettent d'analyser un problème de décision en présence d'irréversibilité et dans un contexte d'information croissante.

Références bibliographiques

- Aghion, P. et P. Howitt (2000). *Théorie de la croissance endogène*, Dunod, Paris.
- Alcamo, J., E. Kreileman, M. Krol, R. Leemans, J. Bollen, J. van Minnen, M. Schaeffer, S. Toet et B. de Vries (1998). Global modelling of environmental change: an overview of IMAGE 2.1, in *Global change scenarios of the 21st century: results from the IMAGE 2.1 Model*, J. Alcamo, R. Leemans et E. Kreileman (dir.), p 3-94, Pergamon/Elsevier Science, Oxford (UK).
- Ayres, R.U. (2001). How economist have misjudged global warming, *World Watch*: Spetember/October.
- Azar, C. (1999). Weight factors in cost-benefit analysis of climate change, *Environmental and Resource Economics*, 13, 249-268.
- Azar, C. et T. Sterner (1996). Discounting and distributional considerations in the context of global warming, *Ecological Economics*, 19, 168-184.
- Azariadis, C. et R. Guesnerie (1986). Sunspots and cycles, *Review of Economic Studies*, 53 (4), 725-737.
- Baron, R. et J.C. Hourcade (1994). The bottom-up versus top-down controversy: A useful provocation for economic research on environment and technological change, Actes du colloque *50th congress of the International Institute of Public Finance: Public finance, environment and natural resources*, Harvard (MA), 22-25 August 1994.
- Barro, R.J. (1991). Economic growth in a cross section of countries, *Quarterly Journal of Economics*, 106, 407-444.
- Broecker, W.S. (1997). Thermohaline circulation, the Achilles heel of our climate system: will man-made CO₂ upset the current balance?, *Science*, 278 (28 November 1997), 1582-1588.
- Bruce, J.P., H. Lee et E.F. Haites (dir.) (1996). *Climate change 1995: Economic and social dimensions of climate change. Contribution of Working Group III to the Second Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, Cambridge University Press, Cambridge (UK&US).
- Carter, T.R., M. Hulme et D. Viner (dir.) (1999). *Representing uncertainty in climate change scenarios and impact studies: EU Concerted Action ECLAT-2 1st Workshop Report (Helsinki, Finland, 14-16 April 1999)*, 129 p, Climate Research Unit, UEA, Norwich (UK).
- Cox, P.M., R.A. Betts, C.D. Jones, S.A. Spall et I.J. Totterdell (2000). Acceleration of global warming due to carbon-cycle feedbacks in a coupled model, *Nature*, 408, 184-187.
- David, P.A. (1985). Clio and the economics of QWERTY, *American Economic Review*, 76, 332-337.
- Domar, E. (1946). Capital expansion, rate of growth, and employment, *Econometrica*, 14 (2), 137-147.
- Dowlatabadi, H. (1999). Integrated assessment: implications of uncertainty, in *Encyclopaedia of Life Support Systems*, Oxford University Press, Oxford.
- Dowlatabadi, H. et M.G. Morgan (1995). *Integrated climate Assessment Model 2.0: Technical discussion*. Department of Engineering and Public Policy, Carnegie Mellon University, Pittsburgh (PA).
- Forrester, J.W. (1971). *World Dynamics*, Wright-Allen Press, Cambridge (MA).
- Friedlingstein, P., L. Bopp, P. Ciais, J.-L. Dufresne, L. Fairhead, H. Le Treut, P. Monfray et J.C. Orr (2001). Positive feedback between future climate change and the carbon cycle, *Geophysical Research Letters*, 28, 1543-1546.

- Funtowicz, S.O. et J.R. Ravetz (1990). *Uncertainty and Quality in Science for Policy*, Kluwer Academic Press, Dordrecht (the Netherlands).
- Giles, J. (2002). When doubt is a sure thing, *Nature*, 418 (August 2002, 1st), 476-478.
- Goulder, L.H. et D. Kennedy (1997). Valuing Ecosystems Services: Philosophical Bases and Empirical Methods, in *Nature's Services: Societal dependence on natural ecosystems*, G.C. Daily (dir.), p 23-47, Island Press, Washington D.C.
- Gritsevskiy, A. et N. Nakicenovic (2000). Modeling uncertainty of induced technological change, *Energy Policy*, 28, 907-921.
- Ha Duong, M. (2003). Possible Global Warming Futures: an Imprecise Probability Theory Approach, Actes du colloque *Annual Meeting of the International Energy Workshop*, EMF/IEA/IIASA (org.), Laxenburg (Austria), 24-26 June 2003.
- Hammitt, J.K., R.J. Lempert et M.E. Schlesinger (1992). A sequential-decision strategy for abating climate change, *Nature*, 357, 315-318.
- Hansen, J., M. Sato, R. Ruedy, A. Lacis et V. Oinas (2000). Global warming in the twenty-first century: an alternative scenario, *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 97 (18), 9875-9880.
- Harrod, R. (1939). An essay in dynamic theory, *Economic Journal*, 49 (193), 14-33.
- Hirshleifer, J. et J.G. Riley (1992). *The analytics of uncertainty and information*, 465 p, Cambridge University Press, Cambridge (UK).
- Hordijk, L., J. van Aardenne et C. Kroeze (1999). Integrated assessment models and uncertainty analysis, Actes du colloque *EFIEA Workshop on Uncertainty*, Baden (Austria), 10-18 July 1999.
- Houghton, J.T., Y. Ding, D.J. Griggs, P.J. Noguer, P.J. van der Linden, X. Dai, K. Maskell et C.A. Johnson (dir.) (2001). *Climate change 2001: the scientific basis. Contribution of Working Group I to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, Cambridge University Press, Cambridge (UK&US).
- Hourcade, J.C. (1997). Précaution et approche séquentielle de la décision face aux risques climatiques de l'effet de serre, in *Le principe de précaution dans la conduite des affaires humaines*, A. Godard (dir.), p 259-294, MSH/INRA, Paris.
- Hourcade, J.C., J.-M. Salles et D. Théry (1992). Ecological economics and scientific controversies: Lessons from some recent policy making in the EEC., *Ecological Economics*, 6, 211-233.
- Hulme, M. et T.R. Carter (1999). Representing uncertainty in climate change scenarios and impact studies, in *Representing uncertainty in climate change scenarios and impact studies: EU Concerted Action ECLAT-2 1st Workshop Report (Helsinki, Finland, 14-16 April 1999)*, T.R. Carter, M. Hulme et D. Viner (dir.), p 13-39, Climate Research Unit, UEA, Norwich (UK).
- Jevons, W.S. (1865). *The Coal Question: an inquiry concerning the progress of the Nation, and the probable exhaustion of our coal-mines.*, MacMillan, London.
- Kaldor, N. (1961). Capital Accumulation and Economic Growth, in *The Theory of Capital*, F. Lutz et V. Hague (dir.), p 177-222, St Martin's Press, NY.
- Kalnay, E. et M. Cai (2003). Impact of urbanization and land-use change on climate, *Nature*, 423 (29 May 2003), 528-531.
- Kandel, R. (2002). *Le réchauffement climatique*, 127 p, PUF, Paris.
- Kann, A. (1998). *A comparison of approaches for performing uncertainty analysis in integrated assessment models*, (WP 14.4). Energy Modelling Forum (EMF), Stanford University, Stanford (CA).

- Katz, R.W. (1999). Techniques for estimating uncertainty in climate change scenarios and impact studies, in *Representing uncertainty in climate change scenarios and impact studies: EU Concerted Action ECLAT-2 1st Workshop Report (Helsinki, Finland, 14-16 April 1999)*, T.R. Carter, M. Hulme et D. Viner (dir.), p 40-55, Climate Research Unit, UEA, Norwich (UK).
- Kolstad, C.D. (2000). *Environmental Economics*, 400 p, Oxford University Press, NY (NY).
- Koopmans, T.C. (1965). On the Concept of Optimal Economic Growth, in *The Econometric Approach to Development Planning*, p 225-287, North-Holland, Amsterdam.
- Krugman, P. (1991). History versus Expectations, *The 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.
- Lave, L.B. et H. Dowlatabadi (1993). Climate Change: The Effects of Personal Beliefs and Scientific Uncertainty, *Environ. Sci. Technol.*, 27 (10), 1962-1972.
- Le Treut, H. et V. Serafini (2002). Modélisation intégrée et incertitudes sur les dommages du changement climatique: programme de recherche autour du modèle IMAGE, in *Modélisation intégrée, évaluation des risques climatiques et des politiques de précaution: Programme GICC (Mete/MIES/Ademe), Rapport final*, J.C. Hourcade et H. Le Treut (dir.).
- Lutz, W., W. Sanderson, S. Scherbov et A. Goujon (1997). Doubling of World population unlikely, *Nature*, 387 (6635), 803-805.
- Maddison, A. (1995). *L'économie mondiale 1820-1992: Analyse et statistiques*, 274 p, OCDE/OECD, Paris.
- Manabe, S. et R.J. Stouffer (1988). Two-stable equilibria of a coupled ocean-atmosphere model, *Journal of Climate*, 1, 841-866.
- Manne, A.S. et R. Richels (1992). *Buying Greenhouse Insurance: The Economic Cost of CO₂ Emissions limits*, MIT Press, Cambridge (MA).
- Manne, A.S. et T.F. Rutherford (1994). International Trade in Oil, Gas and Carbon Emission Rights: an Intertemporal General Equilibrium Model, *The Energy Journal*, 15 (1), 57-76.
- McCarthy, J.J., O.F. Canziani, N.A. Leary, D.J. Dokken et K.S. White (dir.) (2001). *Climate Change 2001: Impacts, adaptation and vulnerability. Contribution of Working Group II to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, Cambridge University Press, Cambridge (UK & US).
- Meadows, D., J. Randers et W. Behrens (1972). *The limits to growth*, Universe Books, NY.
- Morgan, M.G. et M. Henrion (1990). *Uncertainty: a guide to dealing with uncertainty in quantitative risk and policy analysis*, 332 p, Cambridge University Press.
- Morgan, M.G. et D.W. Keith (1995). Subjective Judgments By Climate Experts, *Environmental Science & Technology*, 29, 468-476.
- Mori, S. (2000). The development of greenhouse gas emissions scenarios using an extension of the MARIA model for the assessment of resource and energy technologies, *Technological forecasting and social change*, 63 (2-3).
- Mori, S. et K. Takahashi (1999). An integrated assessment model for the evaluation of new energy technologies and food productivity, *International Journal of Global Energy Issues*, 11 (1-4), 1-18.
- Moss, R. et S.H. Schneider (2000). Uncertainties in the IPCC TAR: Recommendations To Lead Authors For More Consistent Assessment and Reporting, in *Guidance Papers on the Cross Cutting Issues*

- of the *Third Assessment Report of the IPCC*, R. Pachauri, T. Taniguchi et K. Tanaka (dir.), p 33-52, OMM/WMO, Geneva.
- Nakicenovic, N. (dir.) (2000). *Special Report on Emissions Scenarios: a special report of Working Group III of the Intergovernmental Panel on Climate change*, Cambridge University Press, Cambridge (UK&US).
- Nordhaus, W. (1973). World dynamics: measurement without data, *The Economic Journal*, 83 (332), 1156-1183.
- Nordhaus, W. (1992). An optimal transition path for controlling greenhouse effect, *The Economic Journal*, 101, 920-937.
- Nordhaus, W. (1994a). Expert opinion on climatic change, *American Scientist*, 82, 45-52.
- Nordhaus, W. (1994b). *Managing the Global Commons: the Economics of Climate Change*, MIT Press, Cambridge(MA, USA).
- Nordhaus, W. et J. Tobin (1973). Is growth obsolete?, in *The measurement of Economics and Social Performance*, M. Moss (dir.), NBER.
- OMM/WMO (2003). *According to the World Meteorological Organization, extreme weather events might increase. (Press Release n° 695)*, Geneva, 2 July 2003.
- Peck, S.C. et J.T. Teisberg (1992). CETA: a model for Carbon Emissions Trajectory Assessment, *The Energy Journal*, 13, 55-77.
- Peck, S.C. et J.T. Teisberg (1995). Optimal CO₂ control policy with stochastic losses from temperature rise, *Climatic Change*, 31, 19-34.
- Pizer, A.W. (1999). The optimal choice of climate change policy in the presence of uncertainty, *Resources and Energy Economics*, 21, 255-287.
- Planton, S. (1999). Incertitudes sur la détermination des changements climatiques, Actes du colloque *Ecole Thématique "Risques et incertitudes": le cas du changement climatique*, Les Houches (France), 17-22 octobre 1999.
- PNUE/UNEP (2002). *The Asian Brown Cloud: Climate and other Environmental Impacts*, PNUE/UNEP.
- Rahmstorf, S. (1997). Risk of sea-change in the Atlantic, *Nature*, 388 (6645), 825-826.
- Rahmstorf, S. (2002). Ocean circulation and climate during the past 120,000 years, *Nature*, 419 (12 September 2002), 207-214.
- Rahmstorf, S. et A. Ganopolski (1999). Long-term global warming scenarios computed with an efficient coupled climate model, *Climatic Change*, 43 (2), 353-367.
- Ramsey, F. (1928). A mathematical theory of saving, *Economic Journal*, 38, 543-559.
- Roqueplo, P. (1988). Expertise scientifique : le cas des pluies acides, *La Recherche* (205).
- Roughgarden, T. et S.H. Schneider (1999). Climate change policy: quantifying uncertainties for damages and optimal control taxes, *Energy Policy*, 27, 415-429.
- Salles, J.-M. (1993). *Décisions économiques et gestion collective des risques globaux d'environnement*, Thèse de doctorat, EHESS.
- Schneider, S.H. (2001). What is a 'dangerous' climate change?, *Nature*, 411 (3 May 2001), 17-19.
- Schneider, S.H. (2002). Can we estimate the likelihood of climatic changes at 2100?, *Climatic Change*, 52 (4), 441-451.

- Scimemi, G. (1987). Environmental strategies and anticipatory strategies, in *Preventive environmental policy*, U.E. Simonis (dir.), Campus, Frankfurt/M. (Germany) & NY.
- Seager, R., D.S. Battisti, J. Yin, N. Gordon, N. Naik, A.C. Clement et M.A. Cane (2002). Is the Gulf Stream responsible for Europe's mild winters?, *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 128, 2563-2586.
- Shaw, M.R., E.S. Zavaleta, N.R. Chiariello, E.E. Cleland, H.A. Mooney et C.B. Field (2002). Grassland Responses to Global Environmental Changes Suppressed by Elevated CO₂, *Science*, 298 (5600), 1987-1990.
- Skelly, W.C. et A. Henderson-Sellers (1996). Grid box or grid point: what type of data do GCMs deliver to climate impacts researchers?, *International Journal of Climatology*, 16, 1079-1086.
- Solow, R.M. (1956). A contribution to the theory of growth, *Quarterly Journal of Economics*, 70 (1), 65-94.
- Stommel, H. (1961). Thermohaline convection with two stable regimes of flow, *Tellus*, 13, 224-230.
- Summers, R. et A. Heston (1991). The Penn World Table (Mark 5): An expanded set of international comparisons, 1950-1988, *Quarterly Journal of Economics*, 106, 327-368.
- Swan, T.W. (1956). Economic growth and capital accumulation, *Economic Record*, 32, 334-361.
- the IMAGE team (2001). *The IMAGE 2.2 implementation of the SRES scenarios*, CDrom.
- Watson, R.T., I.R. Noble, B. Bolin, N.H. Ravindranath, D.J. Verardo et D.J. Dokken (dir.) (2000). *Land Use, Land-Use Change, and Forestry*, Cambridge University Press, Cambridge (UK).
- WBGU (1999). *A changing world: Managing global environmental risks (1998 annual report)*, Springer, Berlin (Germany).
- Yohe, G. (2002). Estimating benefits: Other issues concerning market impacts, Actes du colloque *OECD Workshop on the Benefits of Climate Policy: Improving Information for Policy Makers*, OECD (org.), OECD, Paris, 12-13 dec. 2002.
- Zahn, R. (2003). Monsoon linkages, *Nature*, 421, 325-326.

Chapitre III

La décision séquentielle comme stratégie de précaution

CHAPITRE III LA DECISION SEQUENTIELLE COMME STRATEGIE DE PRECAUTION.....	119
I. Qu'est-ce que la décision séquentielle ?	124
I.1. Irréversibilité, regret et préférence pour la flexibilité.....	124
I.2. L'apprentissage ou la réduction graduelle des incertitudes	127
I.3. Regrets, incertitudes et arrivée d'information : valeur de quasi-option et effet d'irréversibilité	131
I.3.1 Une première approche avec la valeur d'option.....	131
I.3.2 Un contexte dynamique : la valeur de quasi-option.....	132
I.3.3 Valeur de quasi-option et valeur de l'information	134
I.4. Changement climatique et effet d'irréversibilité : la question 'agir ou attendre ?' est-elle suspendue à la prise en compte de l'amélioration de l'information ?	137
II. Décision séquentielle et évaluation des politiques de stabilisation	138
II.1. Des plafonds de concentration comme mesures des bénéfices des politiques climatiques	138
II.2. Ce que <i>dangereux</i> veut dire	139
II.3. Kyoto en question : quand enclencher l'essentiel des efforts d'abattement ?.....	141
II.3.1 Impact du taux d'actualisation sur le profil temporel des efforts d'abattement	142
II.3.2 Rôle ambivalent des inerties socio-économiques	144
II.3.3 Nature et orientation du progrès technique	145
II.4. Regret environnemental et regret économique : l'apport de la décision séquentielle ..	147
Conclusion	152
Références bibliographiques.....	153
Table des figures	
Figure III-1. Eventail des scénarios SRES et options de stabilisation des concentrations atmosphériques de GES.	140
Figure III-2. Agir ou attendre ?.....	142
Figure III-3. Comparaison des coûts actualisés (à 5% par an) des trajectoires WGI et WRE pour différents plafonds de stabilisation de la concentration atmosphérique de CO ₂ : résultats de trois modèles intégrés.	147
Figure III-4. Stratégie optimale en décision séquentielle.	149
Figure III-5. Influence relative du taux d'actualisation et du degré d'inertie socio-économique sur la décision optimale, en univers certain et en univers stochastique.	150

Le chapitre précédent se conclut sur l'intérêt d'adopter une démarche de décision séquentielle pour chercher un accord à minima pour la décision de court-terme en dépit de controverses sur les objectifs de long-terme et les visions du monde sous-jacentes. En ce sens, l'incertitude n'implique donc pas systématiquement indécidabilité ou pas de mesure de protection de l'atmosphère.

La logique de la décision séquentielle s'articule autour de deux éléments :

- l'incertitude présente et la perspective d'une amélioration des connaissances, et ce faisant, elle fait coexister différentes visions du futur et les relie à nos décisions d'aujourd'hui,
- et la prise en compte de différentes irréversibilités (dans les états du monde futur comme certains types d'impacts du changement climatique ; dans l'éventail de nos choix futurs, comme certaines décisions d'investissement ou de choix techniques) et des options futures qui sont alors menacées par les choix présents. C'est ce risque que [Hourcade et Chapuis, 1995] appellent la capture du long-terme par le court-terme.

Ce faisant, l'approche séquentielle à la décision replace le problème de décision dans une perspective temporelle et le fractionne en une séquence marquée par les dates de réduction de l'incertitude. A chacun de ces nœuds, l'objectif du planificateur est d'évaluer la meilleure action à entreprendre compte tenu des informations en sa possession et de ses anticipations sur le futur (sur les états du monde et sur l'arrivée d'information) afin d'éviter les écueils de choix irréversibles et pouvoir exploiter au mieux toute nouvelle connaissance à venir. C'est ce qu'exprime le GIEC dans son deuxième rapport : *“Climate change demands a decision process that is sequential and can incorporate new information. Timing will be a key element, and the date of resolution of uncertainty an important element of the analysis. (...) A sequential decision-making strategy aims to identify short-term strategies in the face of long-term uncertainty. The next several decades will offer opportunities for learning and making mid-course corrections. The relevant question is not “What is the best course for the next 100 years ?” but rather, “What is the best course for the next few years ?”*” ([Bruce et al., 1996], chap. I § 1.3.2). Ainsi, en séparant la décision de court-terme de l'horizon de long-terme, l'approche séquentielle à la décision permet d'évaluer les incertitudes cruciales pour les choix d'aujourd'hui et dès lors de surmonter –au moins en partie- certaines controverses.

Elle fait ainsi référence à une préférence pour la flexibilité des choix futurs et à un contexte d'information croissante, deux éléments constitutifs du Principe de précaution, auquel renvoie explicitement la Convention climat dans son Article 3¹. Nouvelle norme de décision collective en présence d'incertitude, fondée sur la temporalité des décisions et la temporalité des connaissances, il appelle à agir face à une menace potentielle grave ou irréversible avant même d'obtenir des informations relativement précises – et en ce sens, il renverse la chronologie habituelle où la décision fait suite à l'arrivée de connaissances ou est conçue en réaction à des constats – et il replace la décision dans une perspective temporelle en donnant toute son importance à l'arrivée de connaissances nouvelles. Le Principe de précaution met donc en œuvre un processus de décision séquentielle où chaque nœud de décision vise à préserver la

¹ « Il incombe aux Parties de prendre des mesures de précaution pour prévoir, prévenir ou atténuer les causes des changements climatiques et en limiter les effets néfastes. Quand il y a risque de perturbations graves ou irréversibles, l'absence de certitude absolue ne doit pas servir de prétexte pour différer l'adoption de telles mesures [...] » ([1992], Article 3, alinéa 3).

plus grande flexibilité des choix futurs, choix qui seront effectués éventuellement en fonction d'une réduction des incertitudes. Dans cette interprétation, le Principe de précaution peut ainsi trouver une assise théorique et une traduction économique à partir des travaux sur la décision séquentielle sous incertitude, qui en devient un cadre de mise en œuvre [Hourcade, 1997, 1998; Treich, 1997, 2000].

Ce sont ces différentes notions et leur articulation que nous allons examiner dans une première section pour illustrer comment la décision séquentielle d'une part, peut être considérée comme une traduction du principe de précaution et d'autre part, comment ce mode de décision permet en dépit des controverses sur les choix de long-terme d'aboutir à un accord sur les politiques climatiques à court-terme. Une seconde section illustre ce propos en prenant l'exemple des trajectoires d'émissions correspondant à différentes cibles de stabilisation à long-terme de la concentration atmosphérique de CO₂. Cette section permet également de commencer à poser les éléments du débat sur la question du timing des efforts de réduction des émissions, objet de cette thèse.

I. Qu'est-ce que la décision séquentielle ?

I.1. Irréversibilité, regret et préférence pour la flexibilité

Les controverses sur le bien-fondé et le contenu d'une action face aux menaces du changement climatique cristallisent autour de deux croyances symétriques: d'un côté, de potentiels impacts irréversibles ou au moins significatifs sur quelques générations ; de l'autre, un éventuel regret économique et social à entreprendre dès aujourd'hui des efforts agressifs de réduction des émissions. Ce sont ces deux regrets que nous allons plus spécifiquement examiner ici. Ce faisant nous allons croiser la notion d'irréversibilité, qui nous permettra d'éclairer la nature de ces deux regrets.

Dans le cas du changement climatique, on peut distinguer quatre types d'irréversibilité :

- un premier type, lié à la nature d'externalité (ou de pollution) de stock induite par l'accumulation des GES dans l'atmosphère. Une fois émis, ces gaz y séjournent longtemps (le méthane a une demie-vie atmosphérique de l'ordre de 8 à 12 ans, le dioxyde de carbone de l'ordre de 50 à 200 ans) et les mécanismes qui gouvernent leur disparition de l'atmosphère (transfert vers d'autres réservoirs comme l'océan ou la biosphère, participation aux réactions chimiques atmosphériques) ne peuvent être accélérés par l'intervention humaine (pire elle peut contribuer à l'augmentation des temps de séjour, comme le laissent entendre pour le dioxyde de carbone, l'existence d'une rétroaction positive entre cycle du carbone et réchauffement climatique ou la poursuite de la déforestation, qui diminue la capacité d'absorption des puits biosphériques). De même, l'inertie thermique de l'océan contribue à allonger le temps de réponse de la machine climatique bien au-delà de notre fenêtre d'action : toute décision de réduire les émissions sur les cent prochaines années conditionne de manière irréversible l'expansion thermique des océans et l'évolution des climats sur des millénaires.

- un deuxième type, lié à des impacts irréversibles du changement climatique comme la disparition d'espèces ou d'écosystèmes fragiles (les récifs coralliens), la submersion des territoires insulaires de l'Océan Pacifique et de l'Océan Indien.
- un troisième type, lié à l'irréversibilité des investissements entrepris pour réduire les émissions de GES. Dans une large mesure, les ressources allouées aux efforts d'abattement (R&D dans les domaines des renouvelables, changement de l'appareil productif dans le sens d'une structure moins émettrice, etc.) ne peuvent pas être complètement récupérées pour être affectées à d'autres usages s'il s'avère *ex-post* qu'il n'était pas nécessaire d'entreprendre autant d'efforts.
- un quatrième type, enfin, lié aux bifurcations (phénomène de *lock-in*) dans l'évolution des systèmes technico-économiques ou les perspectives d'aménagement du territoire, que nous avons précédemment évoquées. Selon l'équilibre qui est réalisé, les coûts de réduction des émissions sont plus ou moins élevés (choix du nucléaire, éclatement du tissu urbain, etc.) ou notre vulnérabilité au changement climatique est plus ou moins importante (aménagements côtiers ou urbanisation dans des zones inondables³).

Ces différentes catégories appellent les commentaires suivants, pour clarifier la notion d'irréversibilité en la replaçant dans une perspective temporelle et introduire la notion d'irréversibilité des choix et de flexibilité qui lui est associée. Dans les deux cas, on pourra mesurer toute l'importance des inerties naturelles et socio-économiques.

Dans la problématique du changement climatique, on peut observer des cas où se manifeste une irréversibilité absolue, c'est à dire une situation où il n'est absolument pas possible de faire atteindre au système un état donné (par exemple revenir à l'état initial ou occuper un état jugé souhaitable par la collectivité). La question du temps, au sens de la durée, n'intervient pas : il y a simplement un avant et un après. C'est le cas par exemple de l'extinction d'espèces ou de la disparition d'écosystèmes, ou de la stabilisation « définitive » des concentrations atmosphériques des GES : les tonnes de carbone fossile émises par l'homme se répartissent entre les réservoirs atmosphériques, océaniques et biosphériques et une partie des émissions cumulées séjournent toujours dans l'atmosphère ; même longtemps après l'interruption des émissions, on ne revient donc pas aux niveaux pré-industriels.

Comme pour la distinction entre ressources naturelles épuisables ou renouvelables, il est intéressant de faire intervenir le temps, au sens de la durée. En effet, à l'échelle du millénaire, du siècle ou d'une génération, un nombre croissant de phénomènes nous sembleront irréversibles en raison des inerties naturelles et socio-économiques et des effets de persistance qu'elles induisent. Par exemple, le ralentissement voire l'interruption de la circulation thermohaline n'est pas une situation irréversible à l'échelle des temps géologiques ; cependant, une fois que le phénomène est enclenché, nous ne pouvons pas intervenir et nous devons en supporter les conséquences pendant très longtemps. De même, en cas d'adaptation difficile (parce que le signal du changement climatique n'est pas aisément détectable derrière l'effet de

² [Grésillon, 2003] rappelle à ce titre qu'en France, 80% des constructions en zones inondables ont eu lieu après 1950. Un tel choix d'aménagement implique une très grande vulnérabilité au changement climatique si les tendances récemment observées se poursuivent (inondations hivernales, épisodes de précipitations intenses en été). Puisque l'abandon à court ou moyen terme de ces parcelles de terrain n'est pas réalisable, l'intensification des implantations y conditionne de manière irréversible la nature des options d'adaptation dans le sens d'aménagements intensifs en capital pour se protéger des effets dévastateurs des crues.

masque de la variabilité naturelle du climat ou parce que le rythme du changement climatique et du déploiement de ses impacts est particulièrement rapide), une activité productive ou une région peuvent connaître une accélération des impacts et de leurs conséquences socio-économiques le temps de mettre en place des stratégies d'adaptation appropriées ; elles sont donc exposées de manière irréversible pour un certain laps de temps à des impacts significatifs.

C'est donc plus l'irréversibilité séquentielle que l'irréversibilité absolue (qui en est un cas polaire) qui est un concept pertinent dans le cas du changement climatique. Elle prend sa source dans l'interaction entre temps caractéristiques des phénomènes et temps de la décision [Hallegatte, 2003]. Elle permet d'introduire la notion d'irréversibilité des choix et de flexibilité qui lui est associée. Si nous laissons filer les émissions de GES, leur accumulation progressive dans l'atmosphère nous fait perdre les options de stabilisation de leur concentration aux plafonds les plus bas : aujourd'hui, compte tenu des tendances d'émissions pour les quelques décennies à venir, une stabilisation à 400ppm est complètement irréaliste, à moins d'accepter des mesures drastiques pour infléchir les émissions. C'est en ce sens que l'on peut parler d'irréversibilités des choix : nos décisions présentes influencent les conditions de nos choix futurs, dans le sens d'une restriction des champs du possible³. Le GIEC l'associe d'ailleurs étroitement au paradigme de la décision séquentielle : *"By a sequential decision problem is meant one which is extended in time and in which the consequences for decisions made at one period are initial conditions which affect the decision to be made next"* ([Bruce et al., 1996], chap. II).

Revenons au quatrième exemple d'irréversibilité, qui permet d'illustrer les relations entre flexibilité et inertie. Selon les trajectoires que peuvent suivre les systèmes technico-économiques, on va se retrouver avec des profils d'émissions très divers. Sans inertie socio-économique, le passage des sentiers de développement les plus intensifs en carbone vers les moins intensifs afin de réduire les émissions se fait sans coût d'ajustement ; il n'y a donc de rigidité économique des choix. En présence d'inertie socio-économique en revanche, les coûts de transition d'une économie à fort contenu carbone vers une économie à faible contenu carbone (ce que sont les coûts d'abattement) croissent d'autant plus vite que cette transition est importante et rapide ; le choix d'un certain type de développement peut donc créer une forte rigidité (on ne pourra aller que dans le sens d'une accélération coûteuse des efforts d'abattement) compte tenu des inerties socio-économiques.

Plutôt qu'une discussion sur irréversibilité économique et environnementale, on préférera donc parler d'un regret économique ou d'un regret environnemental qui permettent de rendre compte d'une part, de l'irréversibilité séquentielle et d'autre part, de l'irréversibilité des choix. Ainsi le regret environnemental signifie aussi bien les dégradations de l'environnement (accumulation des GES, changement climatique en cours, impacts de ce changements) que la perte de certaines options de contrôle du changement climatique (avec l'accumulation irréversible à court terme des GES) ; de même, le regret économique recouvre aussi bien l'investissement dédié (à l'adaptation ou à la mitigation) que l'éventualité de devoir accélérer les mesures d'abattement (parce que la structure de l'économie a évolué selon des trajectoires à forte teneur en carbone ou parce qu'on s'est dangereusement rapproché d'un seuil de stabilisation jugé souhaitable).

³ Cette irréversibilité des choix est d'ailleurs souvent représentée dans les modèles théoriques sous forme d'inégalités ou d'inclusions: les variables de décisions futures sont à choisir dans un intervalle restreint par les choix présents.

Savoir quand enclencher l'essentiel des efforts de réduction des émissions dépend de l'équilibre entre ces deux regrets : "Stringent and costly actions taken now might prove to be unnecessary if the climate change problem turns out to be not as bad as we thought. On the other hand, we may regret not acting aggressively now if we learn that the effects of climate change are much more severe than expected" [Webster, 2002].

Quels sont cet 'avant' et cet 'après' ou ce 'maintenant', 'plus tard' ? C'est à l'arrivée de nouvelles connaissances scientifiques que l'on fait allusion : information sur la sensibilité du climat, information sur les impacts, information sur les coûts des politiques climatiques (options techniques, fonctionnement des marchés de carbone, etc.), nouvelles informations que des décideurs futurs seront en mesure d'intégrer dans le processus d'élaboration des politiques climatiques (et ce d'autant mieux que des choix irréversibles n'auront pas été entrepris).

I.2. L'apprentissage ou la réduction graduelle des incertitudes

Kolstad [Kolstad, 1996b] distingue trois modes d'acquisition de l'information:

- un apprentissage par l'expérimentation (dit *actif*), où par une série d'expériences répétées, c'est l'analyse de leurs résultats qui permet de réunir des informations sur les propriétés du système étudié. Par exemple, une entreprise en situation de monopole peut, pour révéler l'élasticité prix de la demande, pratiquer des variations du prix de vente et observer la réaction des consommateurs [Balvers et Cosimano, 1990]. Ce mode d'acquisition n'est pas applicable au cas du changement climatique compte tenu des temps caractéristiques du phénomène (expérience unique) et des évolutions irréversibles qui peuvent s'enclencher.
- un apprentissage par l'achat d'information ou l'investissement dans des activités de recherche. Par exemple, certains investisseurs achèteront auprès de centres de recherche en météorologie des prévisions saisonnières pour les aider à anticiper sur l'évolution du cours des denrées agricoles ou sur l'intérêt de contracter ou d'échanger des dérivés climatiques. De même, les gouvernements financent activement la recherche sur le changement climatique. Le montant de cet investissement est théoriquement en rapport avec les gains attendus d'une telle information et dans cette perspective, est au maximum égal à la valeur absolue de la différence entre le bilan coût-bénéfice d'une décision prise sans information et le bilan coût-bénéfice d'une décision prise en possession de cette information.
- un apprentissage par l'observation (dit *autonome*), où l'analyse d'observations des états de la Nature, du climat ou de l'économie réunies sur la longue durée permet d'accroître les connaissances sur les phénomènes mis en oeuvre et de réduire les incertitudes: 'Il n'est point de secret que le temps ne révèle' (*Britannicus*, IV, 4). Dans une démarche exploratoire, c'est le mode d'apprentissage utilisé par [Kelly et al., 2000] dans un cadre bayésien pour étudier à quelle vitesse se réduisent les incertitudes sur la sensibilité du climat.

Quel que soit, des deux derniers, le mode d'apprentissage retenu, il est légitime de poser la question de la réduction des incertitudes dans le temps : est-elle envisageable, jusqu'à quel point ? à plus ou moins longue échéance ? Si on peut espérer progresser assez rapidement sur certains points (mise en place de réseaux d'observation, de collecte et de traitement des

données pour affiner leur qualité, mise à disposition de calculateurs plus puissants, accumulation des résultats de la paléoclimatologie), de grandes incertitudes subsistent dans la compréhension du comportement de la machine climatique, qui obèrent directement notre capacité prédictive (en particulier les rétroactions, sur lesquelles nous avons beaucoup insisté : rétroaction vapeur d'eau, interaction avec la formation des nuages, liens changement climatique-cycle du carbone, etc). En regardant en arrière, il est indéniable que la masse de connaissances capitalisées depuis au moins dix ans (dont les rapports du GIEC sont autant de jalons) n'a cessé de s'accroître. Pourtant deux questions essentielles n'ont toujours pas de réponse :

- les questions de détection et d'attribution du changement climatique en cours : si le dernier rapport du GIEC indique que le climat a indubitablement changé (*'Is the Earth's climate changing? The answer is unequivocally 'Yes'* [Houghton et al., 2001], TS, p. 25), l'évaluation du poids relatif des différentes causes ne reçoit toujours pas de réponse définitive, entre l'augmentation des concentrations atmosphériques des GES causée par l'homme, l'existence de forçages naturels (aérosols volcaniques, feux de forêts), la variabilité naturelle du climat. Or résoudre la question de l'attribution est un point de passage obligé pour affiner les projections du climat sur les prochaines décennies⁴.
- la question de la dynamique du climat : à quelle vitesse la machine climatique s'écarte de son état actuel pour un forçage donné (quelles sont les inerties en présence ?) et si pendant cette évolution, il existe des bifurcations vers différents régimes à long-terme (quels mécanismes gouvernent ces transitions ?).
- la question de la sensibilité du climat, c'est à dire l'amplitude du réchauffement, mesuré à l'échelle globale, quand le climat a atteint un éventuel nouvel état d'équilibre pour un forçage permanent fixé à deux fois la concentration pré-industrielle de CO₂. C'est une donnée synthétique qui permet de comparer simplement le comportement des grands GCMs. Malgré d'indéniables progrès dans la compréhension de la dynamique du climat et sa représentations dans les modèles, l'intervalle d'incertitude sur ce paramètre ne s'est pas notablement réduit pour autant entre les deux derniers rapports du GIEC (soit 5 ans) : *"The equilibrium climate sensitivity [...] was estimated to be between +1.5°C and +4.5°C in the SAR. This range still encompasses the estimates from the current models in active use"* ([Houghton et al., 2001], chap. IX, p560).

Sur ce point d'ailleurs, [Kelly et al., 2000] établissent qu'il faut plus de cinquante ans pour être certain (à 95%) que la sensibilité du climat se trouve vraiment dans un intervalle centré à $\pm 20\%$ autour de la valeur estimée. Dans une démarche similaire, [Kelly et Kolstad, 1999] trouvent qu'il faut en moyenne 90 ans pour apprendre, c'est à dire beaucoup plus que la fenêtre couramment explorée. Il y a maintenant presque un consensus sur cette question : dans l'état actuel de nos connaissances, beaucoup estiment que compte tenu de la variabilité naturelle du climat et de l'incertitude sur les volumes d'émissions de GES, la distinction entre ces deux effets (donc notre connaissance de la réactivité du climat) ne sera claire qu'à partir de la seconde moitié du siècle.

⁴ A plus long-terme en effet, compte tenu des scénarios d'émissions, le forçage additionnel d'origine humaine est très nettement supérieur aux différents forçages d'origine naturelle.

Les perspectives de réduction des incertitudes ne sont donc peut être pas aussi immédiates ni exhaustives que l'on pourrait le croire. Avant de conclure, on souhaite ajouter deux commentaires.

Le premier a trait aux liens entre faculté d'apprentissage et action : dans le contexte des risques environnementaux globaux, les actions que nous entreprenons pour ralentir les atteintes à l'environnement ont des conséquences directes, dans le sens d'un ralentissement, sur nos facultés d'apprendre des éléments sur les systèmes que nous cherchons à protéger à partir de l'observation. C'est ce que [Fisher et Hanemann, 1987] ont appelé *dependent learning*: "*It surely requires no algebra to show that, if the information about the consequences of an irreversible development action can be obtained only by undertaking development, this strengthens the case for some development*".

Ce paradoxe est par exemple exploré par G. Mégie [Mégie, 1997] à propos du cas de l'ozone stratosphérique. Le point central est la découverte dans les années 1980 des processus de chimie hétérogène, qui, devenant prépondérants quand la charge en chlore de la stratosphère dépasse le seuil de 2 ppb (franchi au début de cette décennie), modifient totalement les équilibres précaires de la haute atmosphère. La compréhension du phénomène accomplit donc un important saut qualitatif. Dans un scénario de politique-fiction cependant, des mesures sont prises pour limiter la production de CFC et la charge en chlore est définitivement stabilisée à 1,9 ppb. « Le seuil de 2 ppb n'ayant pas été dépassé, les scientifiques n'auront pas découvert toute l'importance des processus de chimie hétérogène, et resteront persuadés que les équilibres mis en évidence dans les années 1970 suffisent à expliquer l'équilibre de la couche d'ozone stratosphérique. La catastrophe écologique du trou de la couche d'ozone est très probablement évitée. Il sera certes difficile de convaincre pseudo-experts et sceptiques du bien-fondé des mesures prises » ([Mégie, 1997], p. 240).

Dans le cas du changement climatique, nous devons considérer cet effet, à la fois du côté du climat et de l'environnement et du côté de l'économie et de la technologie. Ainsi, [Kelly et al., 2000] montrent que le temps nécessaire à l'apprentissage sur la sensibilité du climat est significativement allongé si nous contrôlons les émissions de GES et diminué si nous contrôlons les émissions des sulfates. Deux phénomènes influencent en effet de manière antagoniste l'émergence d'un signal de réchauffement au milieu du bruit de la variabilité naturelle du climat, le forçage par les GES contribuant à le renforcer tandis que les aérosols sulfatés contribuent à l'atténuer. Ceci pourrait inciter d'un côté à ne pas entreprendre aujourd'hui d'efforts importants de réduction des émissions de GES pour apprendre vite et mieux sur la dynamique du climat et les impacts. C'est évidemment risqué compte tenu de potentielles irréversibilités et des impacts significatifs qui les accompagnent. D'un autre côté, contrôler les émissions de GES permet de faire émerger des informations sur les techniques, sur le fonctionnement des marchés de carbone, sur les mécanismes institutionnels de la Convention Climat, etc [Ha Duong et al., 1999]. Cet argument plaide, lui, évidemment en faveur du lancement aujourd'hui d'initiatives de réduction des émissions. L'équilibre entre ces deux effets n'a à ce jour pas encore été étudié et c'est surtout le versant environnemental de la question qui a été examiné, ... par les partisans de l'attentisme.

Le second commentaire a trait aux différences de tempo et aux difficultés de synchronisation entre les avancées de la recherche scientifique et sa capacité à produire des éléments qui correspondent aux attentes des décideurs et des citoyens. Or cette forte pression sociale (qui s'exprime entre autres par le biais des financements alloués à telle ou telle orientation de recherche) peut perturber l'agenda *optimal* de la recherche, les objectifs essentiels étant écartés

au profit de questions alors jugées prioritaires tandis que des réponses importantes pour encadrer les risques climatiques pourraient déjà être apportées.

Nous sommes tous désireux d'obtenir le plus rapidement possible des informations sur la réalité des risques climatiques et leur ampleur et nous nous tournons, non sans impatience, vers les climatologues, vers la communauté des impacts, vers les ingénieurs et vers les économistes. Un des efforts majeurs de recherche en ce sens a été la production des scénarios SRES, leur intégration par des GCMs, l'évaluation de certaines catégories d'impacts et des coûts des options d'adaptation et de mitigation. Pour autant, aucune des communautés qui ont contribué à ces travaux ne s'en estime satisfaite : bien sûr, ils ont aidé à définir des problématiques de recherche et possèdent sans conteste une dimension exploratoire néanmoins, ils ne constituent pas de réelles avancées dans la compréhension des phénomènes en jeu et en même temps, les incertitudes sont trop fortes et en font des données trop peu fiables pour éclairer la décision.

Tant que les incertitudes déterminantes sur la dynamique du climat ne seront pas dissipées et que les GCMs ne s'en feront pas l'écho, l'intégration des scénarios SRES ne conservera qu'un caractère illustratif. La communauté des climatologues souhaite avant tout étudier les risques climatiques de long-terme (au-delà de 2100, variabilité du climat à l'équilibre sous $2xCO_2$, $4xCO_2$, irréversibilités potentielles dans l'évolution du climat, inerties en présence, nature des rétroactions) pour comprendre les mécanismes en jeu (ce qui donne déjà un éclairage sur les risques climatiques) avant d'en revenir à une approche prédictive à partir de GCMs au comportement mieux maîtrisé. Dans le même ordre d'idée, alors que beaucoup de compétences ont été développées sur le cycle du carbone, des pans entiers de la chimie de l'atmosphère et de cycles d'autres éléments, comme le méthane, en sont encore à un stade embryonnaire. De même, la question des aérosols reçoit par exemple beaucoup d'attention et c'est un sujet essentiel pour comprendre et suivre l'évolution du climat pour les prochaines décennies mais très vite leur forçage deviendra mineur devant celui du CO_2 (du moins, si l'on en croit les SRES) et beaucoup de questions sur l'évolution du climat à long-terme dirigée par le seul CO_2 sont encore sans réponse.

Ce point permet de rappeler que toutes les communautés n'ont pas été mobilisées avec la même intensité autour des enjeux du changement climatique et que la dynamique du questionnement et de la saisie scientifique des problèmes, au delà de la demande sociale et l'afflux de financements pour la recherche, est également orientée par des effets de mode et le degré d'organisation des communautés.

En définitive, il convient de tempérer la vision positiviste d'une réduction permanente des incertitudes en distinguant l'accumulation des savoirs, produits de la recherche scientifique qui s'accroissent de manière permanente, de l'accroissement des éléments directement exploitables pour la décision, dont la progression n'est pas aussi systématique. Comme l'indique G. Mégie à propos du dossier de l'ozone : « Enfin, l'avancée des connaissances, par les découvertes nouvelles qu'elle implique, ne conduit pas nécessairement à une réduction des marges d'incertitudes pour la prise de décision économique et politique » ([Mégie, 1997], p. 232).

Est-ce à dire que les controverses vont se poursuivre indéfiniment ou que l'on va se trouver encore longtemps dans une situation d'indécidabilité ? On pourrait croire en effet, que la réduction des incertitudes est le préalable à tout accord. Dans la suite de leur article, [Lave et Dowlatabadi, 1993] aboutissent à une conclusion différente (et c'est un constat heureux pour l'émergence de choix collectifs en présence d'incertitude) : « *The degree of optimism of the decision maker is moderately important, but most important is the decision criterion* ». Reprenons l'article où nous l'avions laissé au chapitre précédent, c'est à dire dans un situation

de blocage que l'on peut interpréter soit comme une controverse inconciliable, soit comme une situation d'indétermination compte tenu des gigantesques marges d'incertitudes. Les deux auteurs entreprennent une série de tests de sensibilité pour clarifier l'importance relative entre croyances (sur les dommages d'un scénario de changement climatique donné et sur les coûts d'abattement) et incertitudes (sur l'amplitude du réchauffement). Leur analyse montre qu'à moins de faire varier très fortement les valeurs des paramètres en jeu, on ne peut pas induire de transformation notable des décisions de chacun des groupes d'acteurs. Autrement dit, les attitudes psychologiques déterminent davantage les choix politiques que la qualité de l'information. Par exemple, les environnementalistes, qui valorisent fortement les dommages, considèrent le débat sur les incertitudes comme secondaires : à moins d'éléments nouveaux établissant l'absence de danger, ils ne jugent pas utile d'attendre de plus amples informations pour entreprendre des mesures non symboliques de réduction des émissions. En comparant pour l'ensemble des tests de sensibilité, deux critères de décision dans l'incertain (min-Max et utilité espérée), leur analyse montre que dans l'ensemble les choix optimaux par critère sont conservés (le critère min-Max recommandant, en toute logique, un effort plus important) c'est à dire que l'incertitude scientifique n'est pas l'obstacle principal à la prise de décision.

I.3. Regrets, incertitudes et arrivée d'information : valeur de quasi-option et effet d'irréversibilité

Nous avons rappelé que la décision était suspendue à l'équilibre entre deux regrets :

- *regrets économiques*, d'un côté, liés à l'allocation immédiate de ressources aux politiques climatiques, allocation qui peut s'avérer *ex-post* non efficace parce que des montants trop importants ont été affectés de manière irréversible à un objectif finalement mineur, parce qu'au contraire il faut renforcer notablement les efforts et que compte tenu des inerties socio-économiques, cette accélération induit des coûts supplémentaires, parce qu'enfin les choix initiaux ont induit des dynamiques de développement irréversibles qui conditionnent durablement notre exposition au changement climatique et les coûts des politiques d'adaptation.
- *regrets environnementaux*, de l'autre côté, associés à certains impacts irréversibles ou aux conséquences socio-économiques défavorables du changement climatique qu'auraient à supporter durablement les générations futures.

I.3.1 Une première approche avec la valeur d'option

Compte tenu de ces deux regrets, l'incertitude pèse lourdement dans l'orientation des choix et c'est précisément dans le domaine de l'économie de l'environnement que l'articulation entre ces deux notions a été examinée pour la première fois. Dans son article séminal, [Weisbrod, 1964] introduit la notion de valeur d'option : en présence d'une décision aux conséquences irréversibles, comme l'aménagement d'une zone au détriment des habitats naturels qu'elle contient (réhabilitation d'un cours d'eau, construction de barrage, percée d'autoroute), certains individus accepteront de payer une certaine somme d'argent pour préserver cette zone et conserver la possibilité de bénéficier des aménités offertes dans un avenir plus ou moins lointain. Cette valeur d'option peut être ainsi interprétée comme une sorte de prime pour préserver l'usage futur d'un bien. Weisbrod explique qu'elle doit être prise en compte dans tout calcul coût-bénéfice visant à estimer si cette zone doit être conservée ou destinée à d'autres usages (et elle relève la valeur des bénéfices de préservation).

L'exemple suivant, inspiré de [Bishop, 1986], permet d'illustrer cette notion. Un projet d'aménagement à des fins touristiques dans une vallée de montagne menace l'habitat d'une espèce sauvage. On cherche à évaluer la valeur attribuée par les utilisateurs potentiels à la préservation de cette espèce. Une des personnes interrogée est ainsi prête à payer aujourd'hui jusqu'à 7€ pour préserver le site. Elle n'est pas certaine de pouvoir s'y rendre un jour ; en fait, on estime que sa probabilité de visite est de 50% et dans ce cas, elle annonce retirer de ce voyage - si l'habitat est préservé - un bénéfice de 10€ (disons les dépenses qu'elle accepterait d'engager). Dans cet exemple, l'espérance mathématique du surplus du visiteur est 5€ (s'il ne se rend pas sur le site, son surplus est nul ; on a donc $0,5 \times 0 + 0,5 \times 10 = 5$) ; c'est la mesure qu'utiliserait un décideur si cette personne n'était pas averse au risque. Mais en raison de l'incertitude sur l'usage futur du bien (l'espèce peut effectivement disparaître alors qu'on désire finalement pouvoir l'observer ou que d'autres individus en aient la possibilité), cette personne - qui est averse au risque - est prête à payer 7€ pour préserver l'option de visite ; cette quantité est appelée prix d'option. La valeur d'option est couramment définie comme la différence algébrique entre le prix d'option et le surplus espéré et vaut ici 2€.

Dans cet exemple, l'incertitude porte sur la demande (la personne n'est pas certaine de visiter un jour le site) et sur l'offre (l'aménagement du site peut éventuellement causer la disparition de l'espèce). La valeur d'option fait donc intervenir une préférence pour maintenir la flexibilité des choix et en ce sens peut être interprétée comme une sorte de prime d'assurance contre l'irréversibilité ou les regrets : la somme maximale que l'on accepte de payer pour préserver cette flexibilité en plus de la variation de surplus [Cicchetti et Freeman, 1971]. En conséquence, le signe et l'amplitude de cette valeur d'option vont dépendre du degré d'aversion au risque des individus et de l'incertitude en cause [Schmalensee, 1972].

Les développements théoriques (et les controverses) sur la valeur d'option, sa mesure et sa signification cristallisent finalement autour de la question de l'évaluation des bénéfices en présence d'irréversibilité sous incertitude. C'est l'un des deux axes de recherche qu'a stimulé l'article de Weisbrod : l'existence de regrets en raison de l'incertitude doivent être pris en compte dans toute décision, et une mesure en est la valeur d'option. Cependant, il s'agit d'une notion statique qui ne prend pas en compte l'arrivée d'information : quelle valeur accordons-nous à toute amélioration future des connaissances compte tenu des regrets multiples ? quel est le gain associé à la suspension du choix de préserver ou exploiter dans l'avenir une ressource ? Ces questions qui replacent le problème de décision dans une perspective dynamique en examinant l'articulation entre temporalité de la décision, temporalité des dégradations de l'environnement et temporalité de l'information ont stimulé tout un courant de recherche centré autour de la valeur de quasi-option, que nous allons présenter maintenant.

I.3.2 Un contexte dynamique : la valeur de quasi-option

Cet autre courant de recherche prend également sa source à partir de l'article de Weisbrod et est marqué par les travaux pionniers, publiés la même année, en 1974, de [Henry, 1974] et [Arrow et Fisher, 1974]. Dans ces deux articles, la question centrale est d'examiner comment dans une situation où nos choix entraînent des conséquences irréversibles mais dont l'ampleur est à ce jour encore incertaine (inondation d'une vallée pour construire un barrage causant une perte de la diversité spécifique, conséquences socio-économiques des impacts du changement climatique, etc.), l'arrivée d'information demain modifie nos décisions d'aujourd'hui par rapport à une situation où nous ne disposons jamais de connaissances plus approfondies. On se

place donc dans une optique de décision séquentielle où les différentes dates de la décision sont marquées par la réduction graduelle des incertitudes et où chacune de ces nouvelles informations peut être intégrée au processus de décision pour choisir en meilleure connaissance de cause. Concrètement [Arrow et Fisher, 1974] considèrent un modèle à deux périodes avec une incertitude sur les bénéfices à attendre de la préservation ou de l'exploitation d'un actif environnemental, cette incertitude est totalement levée entre les deux périodes. Par ailleurs, une fois que l'exploitation de la ressource est déclenchée, il est impossible de retourner à la situation initiale ; on ne peut que retarder l'exploitation. Dans le cadre de ce modèle, Arrow et Fisher ont ainsi démontré que l'arrivée d'information conduisait à favoriser la préservation de l'actif environnemental. Autrement dit, l'espoir d'apprendre oriente les actions dans le sens d'une plus grande flexibilité de manière à pouvoir exploiter au mieux les informations qui seront reçues ou, proposition symétrique, choisir une action irréversible dégrade la valeur de l'information car l'éventail des choix futurs s'étant considérablement refermé, la découverte de nouvelles connaissances n'a plus beaucoup d'importance pour un décideur. Henry [Henry, 1974] établit des résultats similaires. Ces trois auteurs ont ainsi été amené à définir le concept de valeur de *quasi*-option pour représenter le bénéfice social lié à l'amélioration future de l'information ou parallèlement lié au maintien d'une plus grande flexibilité des choix futurs. Cette valeur est toujours positive et est indépendante de l'aversion au risque.

Pour bien comprendre la différence entre valeur d'option et valeur de *quasi*-option, prenons l'exemple suivant. Un homme d'affaire doit se rendre de Paris à New York. L'agence de voyages de sa société lui propose deux tarifs : un aller-retour à 3000€ pour un billet non échangeable et non remboursable et un aller-retour à 4000€ pour un billet échangeable et remboursable. Il doit donner sa réponse immédiatement. Sachant que son agenda est très chargé et qu'il n'est pas certain de ses disponibilités, il choisit le billet à 4000€ pour se prémunir contre l'éventualité où la réunion de New York serait annulée ou qu'une autre réunion l'empêche d'arriver à temps à l'aéroport. Cette différence de 1000€ représente la valeur d'option, interprétée comme une sorte de prime d'assurance (payer 1000€ de plus pour éviter d'en perdre éventuellement 3000€ définitivement). En fait compte tenu des conditions concurrentielles du marché du transport aérien, cette différence ne représente qu'une partie de la valeur d'option du consommateur.

Gardons cet exemple, mais passons à une petite entreprise dont le règlement interne stipule que dans une large mesure, les employés doivent préférer pour des raisons budgétaires les vols secs. Nous sommes à quinze jours du départ et on propose toujours à notre homme d'affaires le billet non échangeable et non remboursable à 3000€. Il y a comme précédemment une incertitude sur la réunion de New York : pour le moment, son estimation personnelle est d'une chance sur deux. Mais cette incertitude doit être levée à la fin de la semaine ; d'expérience, l'agence de voyages lui annonce qu'à cette saison elle pourra lui trouver un billet à 7 jours dans les mêmes conditions pour 4000€. Sachant que l'on attend de cette réunion un bénéfice noté NY, quelle décision va prendre notre homme d'affaires ? Le bénéfice net du voyage est donc incertain et l'achat du billet aujourd'hui, puisqu'il est non échangeable et non remboursable, constitue une action irréversible et induit un regret pécuniaire. S'il achète dès aujourd'hui son billet, son surplus espéré est de $-3000 + 0,5xNY + 0,5x0 = -3000 + 0,5xNY$; s'il achète dans une semaine (c'est à dire une fois que l'incertitude est levée), son surplus espéré évalué aujourd'hui est de $0,5x(-4000 + NY) + 0,5x(-0+0) = -2000 + 0,5xNY$ (on ne fait pas ici intervenir de taux d'actualisation). Il a donc tout intérêt à attendre (tant que le coût du billet à 7 jours reste inférieur à 6000€) et la différence de 1000€ peut s'interpréter ici comme la valeur de *quasi*-option : c'est une mesure du bénéfice à retarder la prise de décision irréversible ou, comme on

veut, à conserver la flexibilité des choix⁵. Comme attendre permet d'ajuster son choix, s'il avait un moyen de savoir dès aujourd'hui s'il doit se rendre ou non à New York, notre homme d'affaires serait prêt à dépenser jusqu'à 1000€ pour disposer maintenant de cette information.

I.3.3 Valeur de quasi-option et valeur de l'information

Ce dernier point permet d'introduire une autre interprétation de la valeur de quasi-option, non plus comme une prime à la flexibilité mais comme une valeur de l'information. En fait, nous déjà esquissé comment ces deux notions se combinaient : conserver la flexibilité des choix permet d'ajuster les décisions futures à la lumière de toute nouvelle information, l'arrivée de nouvelles connaissances a donc de la valeur du point de vue du décideur. Toutes les informations n'ont bien sûr pas la même opportunité et leur valeur se mesure par rapport aux gains que l'on peut en espérer.

C'est donc une mesure finalisée de la valeur de l'information que l'on utilise en l'approchant par son coût d'opportunité : combien serait-on prêt à payer pour éliminer ou réduire l'incertitude compte tenu des décisions qu'il faut prendre? Cette question n'a bien sûr d'intérêt qu'en présence d'irréversibilités ou de regrets comme la construction d'un réseau d'observation pour mesurer la qualité des eaux au voisinage d'une décharge, l'achat des prévisions météorologiques avant d'acheter un billet de train pour une destination donnée, le sacrifice de la consommation immédiate en présence d'incertitudes sur les perspectives futures de revenu. Dans cette perspective donc, la valeur de l'information se mesure comme la différence des coûts d'une décision en l'absence de cette information et en présence de cette information et c'est en toute logique cette différence que l'on est au maximum prêt à payer pour réduire l'incertitude⁶.

Il est important de noter que ce que l'on évalue par ce calcul n'est pas le fait qu'un état du monde donné se réalise finalement (il fait beau ou il fait mauvais sur la Côte d'Azur donc j'achète ou pas mon billet de train) et qu'on achèterait cet état du monde mais qu'on dispose d'une meilleure information sur cet état du monde et qu'on peut l'intégrer dans la prise de décision. En ce sens, comme l'arrivée d'information permet de meilleures décisions (dans cette perspective simple, on ne considère pas le fait qu'une fausse information arrive ; la connaissance progresse toujours dans le sens de plus de vérité), la valeur de l'information est toujours positive.

Par ailleurs, cette valeur existe de manière indépendante de l'aversion au risque. Toutes les informations n'ont pas la même valeur selon que les messages sont plus ou moins pertinents pour la prise de décision et un même message n'a pas la même valeur selon la date et le contexte où il est perçu. Si on a déjà acheté un billet de train pour Nice, savoir que dans deux jours on connaîtra les prévisions météo pour la région n'a plus aucun intérêt pour ce qui concerne d'acheter ou pas le billet de train puisque la décision irréversible a déjà été prise. De même, sachant que le prix du billet de train croît progressivement plus on se rapproche de la date du départ (avec le risque qu'il n'y ait plus de places de surcroît), il peut s'établir un

⁵ Cela ne veut pas dire qu'il faut toujours retarder nos choix : si le prix du billet d'avion excède 6000€, il est raisonnable d'acheter le billet aujourd'hui.

⁶ C'est cette approche qui est retenue pour la deuxième catégorie d'apprentissage que nous avons présentée, où l'on est prêt à acheter de l'information jusqu'à un certain coût, produit d'un arbitrage entre bilan de la décision sans information et avec information.

arbitrage entre l'achat du billet et l'attente des prévisions météorologiques donc la valeur que l'on accorde à une telle information selon sa date d'arrivée.

Reprenons maintenant un modèle tiré de [Fisher et Hanemann, 1986] pour examiner les liens entre valeur de *quasi*-option et valeur de l'information. Leur analyse est en partie inspirée de faits réels et s'intéresse à la préservation d'un territoire au Mexique, où a été découverte au début des années 1970 une variété de maïs particulièrement intéressante dans la perspective d'une amélioration des ressources génétiques de cette céréale. Cependant, le développement de nouvelles variétés (à cette époque, on ne peut envisager que le processus traditionnel de croisement et sélection variétale) est un procédé long et dont l'issue est incertaine.

Le cadre de l'analyse est un modèle à deux périodes, indicées 1 et 2, où l'on peut choisir de mettre en valeur ou de préserver le territoire où se trouve cette variété de maïs sauvage. Les bénéfices de la préservation sont incertains et par hypothèse, le projet de développement des parcelles est irréversible (on ne peut redonner au terrain son état primitif et le choix de première période conditionne le choix de seconde période). L'incertitude se réduit graduellement au cours du temps et on fait l'hypothèse que toute l'information nécessaire est disponible au début de la seconde période.

Introduisons les notations :

d_1 niveau de développement entrepris à la première période. Il vaut 0, on retarde le projet de développement, ou 1, le projet débute à la première période. Il n'y a donc pas de continuum de choix : les choix sont discrets.

d_2 niveau de développement entrepris à la seconde période. Comme précédemment, il vaut 0, on retarde le projet de développement, ou 1, le projet débute à la seconde période.

$d_{1,2}$ représente en fait en pourcentage la superficie de terrain qui a été mise en valeur : on a donc $d_1 + d_2 \leq 1$. Cette contrainte géométrique introduit une irréversibilité dans les choix : $0 \leq d_2 \leq 1 - d_1$; elle est renforcée par le fait que les choix sont discrets: en effet, si l'exploitation a eu lieu en première période ($d_1=1$), alors $d_2=0$.

$B_1(d_1)$ désigne le bénéfice net du développement, à la première période.

$B_2(d_1 + d_2, \theta)$ désigne le bénéfice net (actualisé) du développement, à la seconde période. θ est une variable aléatoire qui représente l'état de la connaissance sur les bénéfices à attendre des ressources génétiques de l'écosystème préservé.

Le planificateur recherche la décision qui maximise la somme des bénéfices attendus sur les deux périodes. Soit $\hat{V}(d_1)$, la valeur espérée sur les deux périodes, comme fonction de la décision de première période, $d_1 = 0$ ou 1, sachant que la décision de seconde période, d_2 , est prise avec information complète.

Si on décide de retarder le développement d'au moins une période ($d_1 = 0$), on a

$$\hat{V}(0) = B_1(0) + E_0 \left[\max_{d_2} \{ B_2(0, \theta), B_2(1, \theta) \} \right].$$

Si au contraire, on décide de commencer sans retard l'exploitation ($d_1 = 1$ alors $d_2 = 0$), on a

$$\hat{V}(1) = B_1(1) + E_0 [B_2(1, \theta)].$$

Le choix de la décision optimale de première période, \hat{d}_1 , se fait en comparant les deux expressions précédentes

$$\hat{V}(0) - \hat{V}(1) = B_1(0) - B_1(1) + E_0 \left[\max_{d_2} \{B_2(0, \theta), B_2(1, \theta)\} \right] - E_0 [B_2(1, \theta)]$$

et on choisit \hat{d}_1 tel que

$$\hat{d}_1 = \begin{cases} 0 & \text{si } \hat{V}(0) - \hat{V}(1) \geq 0 \\ 1 & \text{si } \hat{V}(0) - \hat{V}(1) < 0 \end{cases}$$

On suppose maintenant que le planificateur n'attend pas la résolution des incertitudes pour choisir d . Les deux décisions sont donc prises dès aujourd'hui et comme précédemment, le planificateur compare les bilans coût-bénéfice des deux alternatives suivantes :

Si on décide de retarder le développement d'au moins une période ($d=0$), on a

$$V^*(0) = B_1(0) + \max_{d_2} \{E_0 [B_2(0, \theta)], E_0 [B_2(1, \theta)]\}.$$

Si au contraire, on décide de commencer sans retard l'exploitation ($d=1$ alors $d_2=0$), on a

$$V^*(1) = B_1(1) + E_0 [B_2(1, \theta)].$$

Le choix de la décision optimale de première période, d_1^* , se fait en comparant les deux équations précédentes

$$V^*(0) - V^*(1) = B_1(0) - B_1(1) + \max_{d_2} \{E_0 [B_2(0, \theta)], E_0 [B_2(1, \theta)]\} - E_0 [B_2(1, \theta)]$$

et on choisit d_1^* tel que

$$d_1^* = \begin{cases} 0 & \text{si } V^*(0) - V^*(1) \geq 0 \\ 1 & \text{si } V^*(0) - V^*(1) < 0 \end{cases}$$

Comment comparer les deux situations, c'est à dire, quel est le bénéfice social pour le décideur de prendre en compte l'arrivée d'information ? On va soustraire les fonctions valeurs dans chacun des cas

$$[\hat{V}(0) - \hat{V}(1)] - [V^*(0) - V^*(1)] = \hat{V}(0) - V^*(0)$$

$$\text{car } \hat{V}(1) = V^*(1) = B_1(1) + E_0 [B_2(1, \theta)].$$

Il vient donc

$$\hat{V}(0) - V^*(0) = E_0 \left[\max_{d_2} \{B_2(0, \theta), B_2(1, \theta)\} \right] - \max_{d_2} \{E_0 [B_2(0, \theta)], E_0 [B_2(1, \theta)]\}.$$

De la convexité de la fonction maximum et de l'inégalité de Jensen (que l'espérance d'une fonction convexe d'une variable aléatoire est supérieure ou égale à la fonction convexe de l'espérance de cette même variable aléatoire), on dérive

$$\hat{V}(0) - V^*(0) \geq 0.$$

C'est cette différence qui a été interprétée comme la valeur de *quasi-option* dans la littérature: elle traduit le bénéfice social à prendre en compte dans le processus de décision l'arrivée d'information (autrement dit, toute politique en boucle ouverte est préférable à une politique en boucle fermée). Cela ne veut pas dire pour autant qu'il faille nécessairement retarder la mise en valeur des terres (après tout on peut avoir $\hat{V}(0) - \hat{V}(1) < 0$) mais ici, compte tenu du regret environnemental, l'espoir de connaissances futures fait pencher un peu plus la balance en

faveur de plus de flexibilité (on retarde l'action) de manière à pouvoir mieux exploiter l'information.

En remarquant que $\hat{V}(0)$ désigne la fonction valeur associée au retard de l'exploitation du terrain avec apprentissage et $V^*(0)$ la même fonction en absence d'apprentissage, on peut également interpréter cette différence comme la valeur de l'information *conditionnelle* au fait de préserver la flexibilité des choix ($d=0$ donc $d_t=0$ ou 1). C'est cette interprétation qu'en propose [Hanemann, 1989] en définissant la valeur de *quasi-option* comme « *the expected value of perfect information conditional on no development occurring initially* ».

I.4. Changement climatique et effet d'irréversibilité : la question 'agir ou attendre ?' est-elle suspendue à la prise en compte de l'amélioration de l'information ?

Appliqué au cas du changement climatique, qu'en est-il de l'effet d'irréversibilité mis en évidence par [Arrow et Fisher, 1974] et [Henry, 1974] ? Espérer en apprendre davantage sur les bénéfices des politiques climatiques conduit-il à réduire les émissions malgré tout ? Dans une perspective théorique, des conclusions rigoureusement opposées ont été atteintes : d'un côté par exemple, [Chichilnisky et Heal, 1993] établissent que cet effet plaide en faveur d'une baisse immédiate des émissions de GES ; de l'autre, [Ulph et Ulph, 1997], [Kolstad, 1996a] en mettant en avant les regrets économiques aboutissent à une conclusion opposée. En examinant la valeur de quasi-option, [Ha Duong, 1998b] trouve que dans la plupart des cas c'est le regret environnemental qui domine le regret économique, orientant la décision dans le sens d'une réduction des émissions.

Mais l'ambition analytique de tels modèles les contraint à rester relativement synthétiques et beaucoup d'aspects de la question ne peuvent y être correctement représentés : par exemple, la « première » période dure quelques décennies et le niveau d'abattement est souvent discret (valant 0 ou 100%) ; le climat est représenté par un scalaire pour la concentration atmosphérique des GES et l'élévation de la température moyenne même globale n'y figure pas ; *etc.* Ce sont donc des modèles intégrés beaucoup plus développés qui ont été utilisés : ils représentent mieux les différents maillons de la chaîne causale qui va des émissions de GES aux conséquences socio-économiques des impacts du changement climatique ; ils tentent de mieux prendre en compte l'incertitude et les phénomènes d'apprentissage ; les échelles de temps sont plus adaptées aux rythmes de l'économie et aux rythmes de la Nature ; ils essaient de mieux représenter les coûts des politiques de mitigation ; certains prennent en compte l'adaptation ; ... Mais cette multitude de modèles, cette multitude d'hypothèses donc, n'aboutit pas, sans surprises, à un consensus sur la question attendre ou pas, c'est à dire lequel des deux regrets l'emporte.

La complexité de ces modèles rend difficile la définition de la valeur de *quasi-option* comme le rappelle [Hanemann, 1989]. C'est donc plutôt la valeur de l'information que l'on peut choisir d'évaluer pour examiner quelles sont les incertitudes cruciales pour la décision, c'est à dire permettre de les hiérarchiser, comment évolue cette valeur selon la date d'arrivée de résolution des incertitudes et comment est modifiée cette valeur selon les décisions de court-terme. De tels travaux ont été entrepris par exemple par [Peck et Teisberg, 1993a, b; Peck et Teisberg, 1996], [Manne et Richels, 1992] ou [Nordhaus et Popp, 1997]. Ainsi, [Peck et Teisberg, 1993a] ont

été parmi les premiers à représenter l'apprentissage (autonome) dans ces modèles et leur conclusion est la suivante : si l'incertitude sur la dynamique du climat ou les dommages est importante pour la décision, la valeur de l'information associée à ces paramètres évolue peu dans les décennies à venir ; il n'y a donc pas d'urgence à réduire cette incertitude. De telles conclusions sont facilement exploitées comme une justification de l'attentisme. Par exemple, les résultats de [Manne et Richels, 1992] mettent en évidence qu'il peut y avoir un très grand intérêt à réduire les incertitudes liées au climat et les auteurs suggèrent en conclusion : « *There is less need for precautionary emission reductions if we undertake a sustained commitment to reducing climate uncertainty and developing new supply and conservation options* ». C'est peut-être placer beaucoup de confiance dans notre capacité à réduire effectivement à temps les marges cruciales d'incertitudes.

Ainsi, en conclusion de cette section sur valeur de *quasi*-option et valeur de l'information, on souhaite souligner que la valeur de l'information doit surtout être utilisée comme un indicateur pour mesurer l'importance relative des incertitudes vis à vis de la décision, en particulier la question de la date à laquelle elles sont résolues. Sa valeur absolue, étant très dépendante des hypothèses sur les coûts et les dommages, qui donnent l'échelle de la fonction objectif, n'est pas forcément significative et l'utiliser comme indicateur des montants à allouer aux programmes de recherche sur le changement climatique en est sans aucun doute une application périlleuse.

II. Décision séquentielle et évaluation des politiques de stabilisation

Cette seconde section est consacrée à un exemple d'application d'une approche séquentielle à la décision en matière de politique climatique: le choix d'une politique de stabilisation à long-terme de la concentration atmosphérique des GES en présence d'incertitude sur la valeur même de cet objectif. Ce faisant, nous commençons à parcourir les différentes mesures des bénéfices des politiques climatiques, que nous avons présentées au premier chapitre. C'est en amont de la chaîne causale qui va des émissions de GES aux dommages que débute cette exploration avec la plus simple et la plus aisément évaluable de ces mesures, à savoir les plafonds de concentrations.

A côté d'une illustration d'une approche séquentielle comme interprétation du principe de précaution et à même de dépasser certaines controverses au cœur du dossier effet de serre, cette section nous permettra de présenter la problématique de la *when flexibility*, que l'objet de cette thèse est d'examiner en comparant les recommandations obtenues pour ces différentes mesures des bénéfices des politiques climatiques et les cadres d'analyse de la décision qui leur sont associés.

II.1. Des plafonds de concentration comme mesures des bénéfices des politiques climatiques

L'objectif de la Convention climat fait explicitement référence à une stabilisation à long-terme des concentrations atmosphériques des GES. Une telle approche dessine ainsi des contraintes environnementales, ici des plafonds de concentrations, au-delà desquelles les menaces du changement climatique pourraient devenir inacceptables. Nous avons vu au premier chapitre

que le choix d'une telle mesure des bénéfices des politiques climatiques était le fruit d'un arbitrage entre *précision* de la description des phénomènes en jeu et de la description des conséquences des politiques choisies et *pertinence* de la mesure retenue en regard des préoccupations des décideurs. Certes, les plafonds de concentration sont une échelle bien grossière pour représenter la diversité des risques du changement climatique (des concentrations aux dommages, il y a plus d'un pas et nous sommes en présence d'une mesure peu tangible des risques du changement climatique) et les enjeux distributifs qui leur sont associés (il s'agit ici d'une mesure des risques à long-terme et c'est de plus un repère à l'échelle globale) mais dans l'attente de données plus consistantes et plus fiables⁷, c'est une première approximation pour évaluer les politiques de protection de l'atmosphère. Dans le cas de l'ozone stratosphérique, [Hammit, 1999] rappelle que de même, du milieu des années 1970 jusqu'au Protocole de Montréal, on s'en est tenu à un indicateur idéalisé, la perte totale d'ozone sur une colonne d'atmosphère (une moyenne annuelle globale), bien éloigné des impacts potentiels d'une réduction de la couche d'ozone stratosphérique sur l'agriculture et la santé humaine.

II.2. Ce que *dangereux* veut dire

Comment définir un niveau de « risque acceptable » et fixer dès lors la valeur du plafond ? Dans la balance entre coûts de mise en œuvre des politiques climatiques et conséquences socio-économiques du changement climatique évitées, c'est une approche qui se trouve davantage orientée vers les dommages (ce qu'est une approche de type sécurité absolue, où on définit un seuil de danger et on recherche la meilleure politique pour le respecter) que vers les coûts (ce qu'est une approche de type sécurité minimale, où on part d'un accord minimal sur le coût de la précaution qui détermine de fait le niveau d'effort accepté et les impacts résiduels). Autrement dit, c'est une approche qui, en faisant l'hypothèse d'une fonction de dommages à seuil, définit le niveau de danger comme le point où le bénéfice marginal de protection de l'atmosphère croît soudainement et, en dépit des incertitudes sur les coûts de réduction des émissions, a de grandes chances de couper la courbe de coût marginal de contrôle de la pollution.

⁷ A propos du temps nécessaire à l'acquisition d'une mesure fiable et non controversée des bénéfices des politiques climatiques, on doit remarquer que plus on choisit une mesure aval le long de la chaîne causale qui va des émissions de GES aux dommages, plus les difficultés de détection et d'attribution du signal comme une conséquence d'un changement climatique d'origine humaine deviennent importantes et peuvent prêter à des interprétations controversées. Par exemple, s'il est établi que la température moyenne globale s'est significativement élevée au cours du XX^{ème} siècle, la part de responsabilité anthropique dans cette tendance, via les émissions de GES, demeure une question ouverte ; ici, la détection ne pose pas de problème, c'est l'attribution qui reste en suspens. Si l'on retient comme mesure cette fois, non plus l'élévation de la température moyenne globale mais des indicateurs d'impacts (occurrence d'événements météorologiques extrêmes, intensité de leurs conséquences, etc.), la question de leur interprétation comme manifestations du changement climatique et celle de l'évaluation de la part de responsabilité humaine dans leur occurrence est beaucoup plus épineuse que précédemment en raison des multiples facteurs qui influencent notre vulnérabilité au climat.

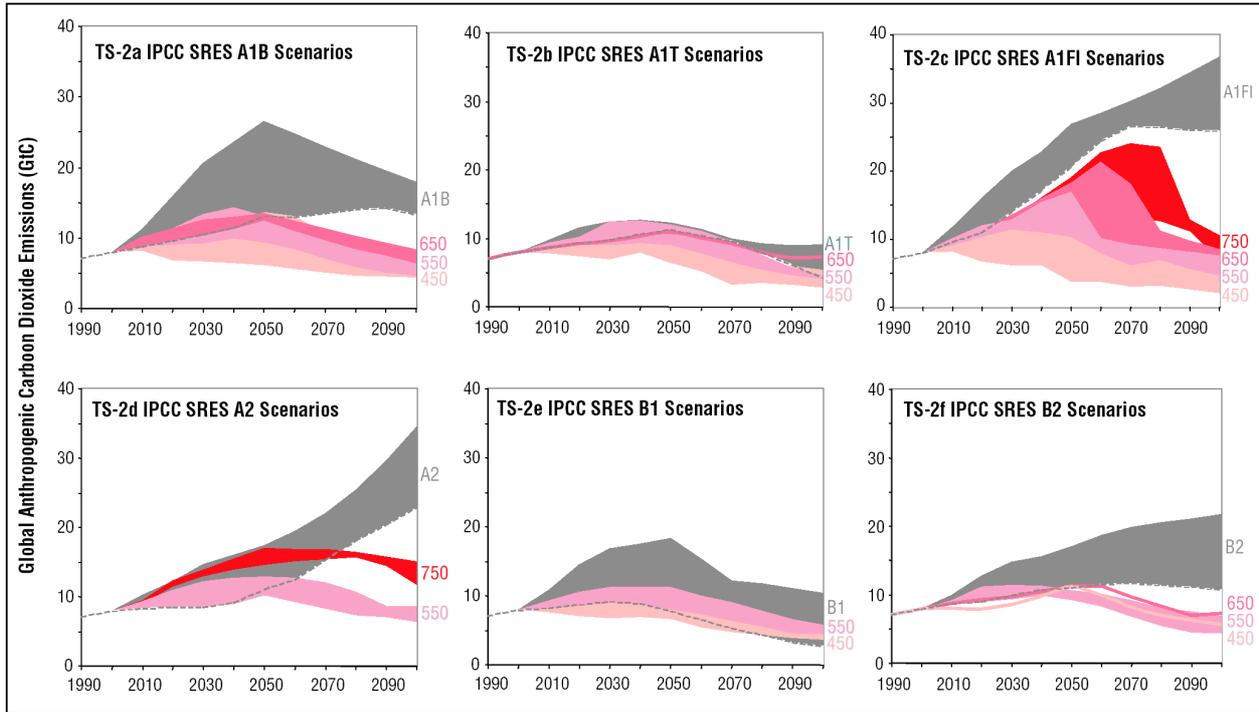


Figure III-1. Eventail des scénarios SRES et options de stabilisation des concentrations atmosphériques de GES.

Sur cette figure sont représentés pour chacun des scénarios SRES (la famille A1 étant subdivisée en un scénario dit équilibré (A1B), un scénario où la transition vers les énergies renouvelables s'opère rapidement (A1T) et un scénario qui reste très intensif en carbone (A1FI)), les volumes d'émissions de CO₂ pour les scénarios de référence (aires les plus foncées qui représentent l'éventail des scénarios élaborés pour chaque histoire narrative) et pour différentes options de stabilisation à 450, 550, 650 et 750 ppm (aires plus claires). Cette figure montre que pour des objectifs de stabilisation contrastés, les efforts de court-terme peuvent déjà différer beaucoup (c'est particulièrement net pour le scénario A2). Elle montre par ailleurs que l'intensité des efforts est logiquement très dépendante du scénario de référence retenu (comparer A1T et A1FI, par exemple) et en particulier que la différence entre les différents scénarios de stabilisation pour un même scénario de référence peut être aussi importante que la différence entre les différentes familles de scénarios de référence. L'incertitude sur les futurs techniques, sociaux et économiques est donc déterminante. Source : [Metz et al., 2001], TS, Figure TS.2.

C'est à dire que même dans le cadre d'une analyse coût-efficacité, les débats sur la valorisation des bénéfices des politiques climatiques font leur apparition. Décider que stabiliser à 550ppm est l'objectif à retenir relève en effet d'un arbitrage global qui fait intervenir de manière plus ou moins explicite des jugements de valeur sur l'équité (les enjeux distributifs et les générations futures), l'importance que l'on attache aux écosystèmes, l'attitude face à un risque sans commune mesure avec l'expérience humaine, les croyances sur les coûts de la mitigation et les perspectives d'adaptation. Ainsi, dans l'optique d'une négociation internationale où les conséquences socio-économiques des impacts du changement climatique sont très inégalement réparties de même que les gisements de réduction des émissions de GES, les différences de perception sur les coûts et les dommages de chaque partie rendent difficile tout accord sur ce point⁸.

⁸ Et précisément, si elle avance certains éléments pour définir en quoi consiste un changement climatique dangereux (menaces sur la biodiversité, risques pour la sécurité alimentaire et les conditions de vie des populations, barrières au développement), la Convention climat ne stipule aucun plafond de concentration souhaitable.

On se retrouve ainsi avec un très large éventail de plafonds de stabilisation à long-terme des concentrations atmosphériques de GES et selon que l'on est environnementaliste ou fondamentalement optimiste, on arguera pour une stabilisation correspondant à une faible perturbation des cycles naturels, du côté de 350-400ppm (et ce presque malgré les coûts car les impacts sont très fortement valorisés et que l'aversion au risque est forte) ou au contraire pour une stabilisation à un niveau plus élevé, du côté de 650-700ppm, car on ne souhaite ni trop dégrader la Terre pour les générations futures, ni trop malmener nos perspectives de croissance. Bien évidemment, ces positions fort différentes défendent chacune des niveaux d'effort très contrastés déjà à court-terme, (comparer sur la Figure III-1, les niveaux d'effort pour la décennie 2010-2020 selon que l'on vise une stabilisation à 550 ou 750 ppm avec le scénario A2 pour scénario de référence).

II.3. Kyoto en question : quand enclencher l'essentiel des efforts d'abatement ?

Mais, et c'est un autre aspect des controverses sur le contenu des politiques climatiques, les débats ne s'arrêtent pas au choix d'une cible de long-terme. Même s'il existait un accord aujourd'hui sur un plafond donné de concentration, plusieurs trajectoires d'émissions - qui se différencient par la date et le rythme du décrochement du scénario de référence - sont envisageables. Autrement dit, en plus d'une incertitude sur les objectifs de long-terme des politiques climatiques et dans un premier temps, de manière indépendante de celle-ci, des incertitudes sur le contenu à court-terme des politiques climatiques existent : faut-il entreprendre dès maintenant des efforts de réduction des émissions pour amorcer une transition graduelle de nos systèmes énergétiques ou bien au contraire investir dans la recherche et le développement en direction de nouvelles sources d'énergie à faible contenu carbone et planifier des sociétés à bas profil d'émissions pour entreprendre une transition certes plus rapide mais moins coûteuse, alors que ces innovations auront porté leurs fruits. Derrière ces controverses, c'est bien sûr la question du bien-fondé du Protocole de Kyoto qui est en jeu : avec quelles trajectoires d'émissions sur les 100 prochaines années est-il compatible et s'agit-il des trajectoires à moindre coût pour satisfaire un objectif donné, pouvant varier de 350 ppm à 750 ppm, voire au-delà ?

Dans une contribution désormais célèbre, Wigley, Richels et Edmonds (WRE) [Wigley *et al.*, 1996] proposent des profils d'émissions qui permettent de respecter des cibles de stabilisation à long-terme tout en repoussant de quelques décennies l'essentiel des efforts de réduction des émissions (Figure III-2). En d'autres termes, il n'y a pas d'urgence à imposer des engagements aussi contraignants que ceux du Protocole de Kyoto.

L'analyse de WRE repose essentiellement sur des considérations liées au cycle du carbone : quelle est la trajectoire d'émissions qui permet, compte tenu des contraintes environnementales, de décrocher le plus tard possible ? Leur contribution permet d'organiser les éléments du débat dans un cadre d'analyse mais à ce stade, les considérations économiques sont encore discrètes. Des études plus avancées ont été entreprises (par exemple, [EMF, 1997] et [EMF, 1999] ; voir [Metz *et al.*, 2001] (notamment § 8.4) pour une revue), pour examiner les coûts des politiques de stabilisation des concentrations atmosphériques des GES selon le

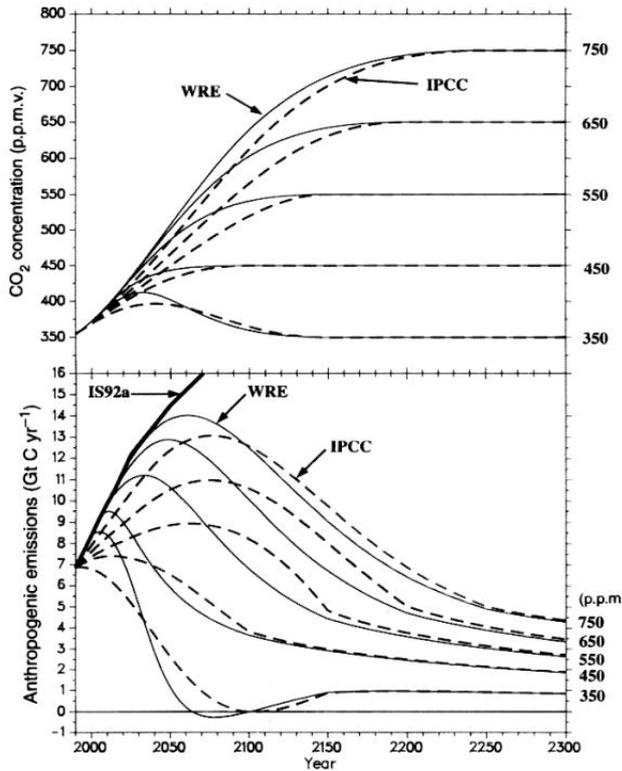


Figure III-2. Agir ou attendre ?

Pour cinq cibles de stabilisation étagées régulièrement de 350ppm à 750ppm, la figure donne des trajectoires d'émissions compatibles avec ces objectifs. Pour chaque cible, le découplage d'avec le scénario de référence (ici IS92a) peut avoir lieu maintenant (trajectoires proposées par le GIEC, pointillés) ou plus tard (trajectoires proposées par WRE, trait plein). On peut donc choisir soit une transition progressive (GIEC) soit une transition plus tardive mais plus rapide (WRE).

Source : [Wigley et al., 1996], Figure 1.

plafond retenu et la chronique des efforts (voir Figure III-3). Ces analyses, dans un cadre coût-efficacité et pour une cible choisie à l'avance, font ressortir trois déterminants qui font pencher la balance soit dans le sens d'une action précoce, soit d'un retard de l'action : l'actualisation et ses liens avec l'équité intergénérationnelle, les inerties socio-économiques et l'orientation du progrès technique⁹. Passons les en revue.

II.3.1 Impact du taux d'actualisation sur le profil temporel des efforts d'abattement

Les politiques climatiques auront des conséquences pour les générations présentes et les générations futures et toute décision - en terme d'effort de réduction des émissions demandé à chaque génération - reflète une pondération implicite ou explicite des générations. Dans une large mesure, le taux d'actualisation qui permet de comparer des flux financiers présents et futurs, des paniers de consommation présents et futurs ou des niveaux de satisfaction présents et futurs, représente de manière explicite cette pondération. Dans un cadre coût-efficacité, une valeur élevée du taux d'actualisation diminue la valeur actualisée des coûts futurs et se traduit ainsi par une tendance à repousser les efforts de réduction des émissions de la génération présente vers les générations futures. Il s'agit donc d'un paramètre essentiel dans la question du timing et le choix d'une valeur appropriée pour le taux d'actualisation est l'occasion de nombreux débats entre les tenants d'une référence aux marchés financiers qui plaident pour

⁹ En toute rigueur, il conviendrait de rajouter, du côté des systèmes naturels, le comportement du cycle du carbone en présence d'une atmosphère plus riche en CO₂ et sous climat modifié. Nous avons vu au chapitre II que des analyses récentes indiquent que la dynamique du cycle du carbone est sensible à la chronologie des émissions (liée à un décrochage plus ou moins tardif) comme à leur volume cumulé (lié au niveau ultime de protection de l'atmosphère) et que de tels résultats suggèrent de réviser à la baisse les trajectoires d'émissions admissibles pour une cible donnée, donc d'agir plus tôt. Mais l'impact de cet effet n'a pas encore été évalué quantitativement.

l'adoption d'une valeur entre 8 et 10 % et les tenants d'une équité inter-générationnelle forte qui plaident pour l'adoption d'une valeur tendant vers 0.

Il est cependant possible de clarifier ces débats. On peut d'abord rappeler que compte tenu de l'horizon temporel envisagé pour les politiques climatiques, la référence aux marchés financiers de court-terme n'est pas appropriée ; dans cette même optique, c'est par exemple le taux des emprunts d'Etat à long-terme (c'est à dire un placement à long-terme sans risque) qui devrait servi de référence, éliminant ainsi le côté haut de la fourchette¹⁰.

Mais, on est là dans une approche normative, où le taux est imposé. En fait, le taux d'actualisation reflète l'arbitrage entre un sacrifice de consommation présente pour financer un investissement donné et la productivité de cet investissement le long d'un sentier de croissance. Sa valeur est donc étroitement liée aux perspectives de croissance, autrement dit au modèle de croissance sous-jacent. Dans ce contexte, on montre que le taux d'actualisation optimal, ρ , vérifie la relation suivante :

$$\rho = \delta - g.v$$

- où δ , la préférence pure pour le présent, traduit notre impatience pour un bien-être immédiat au détriment de l'investissement donc des perspectives de croissance pour les générations futures.
- g représente le taux de croissance optimal de l'économie. A titre de comparaison, les taux de croissance moyens annuels dans les scénarios SRES [Nakicenovic, 2000] sont compris entre 1 et 3%.
- v est l'élasticité de l'utilité marginale de la consommation¹¹. Si on fait l'hypothèse de l'utilité croissante de la consommation et de la décroissance de l'utilité marginale de la consommation (un euro gagné rapporte plus d'utilité au pauvre qu'au riche), ce paramètre (néгатif) mesure à quel taux décroît l'utilité marginale de la consommation quand le revenu augmente. C'est un paramètre peu observable et le GIEC ([Bruce et al., 1996], chap. IV) cite des évaluations empiriques entre -0,8 à -1,6% (si on prend une fonction logarithme népérien, il est constant et vaut -1).

Cette égalité représente bien comment le taux d'actualisation résulte d'un arbitrage entre satisfaction immédiate (représentée par δ , plus l'impatience est forte, plus le taux d'actualisation est élevé) et gain d'utilité future (représenté par $-g.v$, plus les perspectives de croissance sont optimistes - c'est à dire g est élevé, moins un euro supplémentaire investi rapportera d'unités de bien-être futur que s'il était consommé maintenant, le taux d'actualisation en est donc relevé). C'est l'argument majeur en faveur d'un report des efforts : une même dépense pèse moins sur notre bien-être demain qu'aujourd'hui à la fois parce que les flux futurs sont moins valorisés en terme de bien-être que les flux présents (influence de δ) et parce qu'en faisant l'hypothèse d'une croissance économique continue (g positif), cette même dépense pèse moins sur le bien-être des générations qui nous suivent car elles sont plus riches.

Dès lors, le choix du taux d'actualisation n'est plus libre mais dépend de l'articulation entre trois paramètres : l'impatience et l'équité intergénérationnelle, le scénario de croissance,

¹⁰ Ainsi [Newell et Pizer, 2001] rappellent-ils que les bons à long-terme du Trésor américain présentent, en dépit de fortes fluctuations, une tendance baissière : leur taux passe de 6 à 8% dans les années 1790-1810 à 2 à 4% depuis 1950 (avec une pointe à 6% pendant la période 1978-1982). Ces ordres de grandeur - qui ne fournissent cependant pas une tendance extrapolable sur le XXIème siècle - sont bien éloignés des valeurs proposées pour une taux d'actualisation public de long-terme entre 8 et 10%.

¹¹ Si $u(.)$ désigne la fonction d'utilité et c le niveau de consommation, on a $v = c u''(c) / u'(c)$.

notamment la dynamique du progrès technique et la manière dont les impacts du changement climatique pourraient infléchir les trajectoires de développement socio-économique, et les préférences individuelles, en particulier des préférences pour l'environnement et le régime climatique que nous connaissons actuellement. [Lecocq et Hourcade, 2003] examinent en détail comment l'influence de chacun de ces paramètres contribue à moduler la valeur du taux d'actualisation et soulignent en particulier la nécessité de replacer les débats sur le choix de la « bonne » valeur du taux d'actualisation dans le cadre d'une vision cohérente des perspectives de croissance, en prenant en compte les incertitudes multiples sur le long-terme. Ainsi, choisir un taux d'actualisation à 9%, pour une préférence pure pour le présent proche de 4% (du côté haut de la fourchette proposée par [Arrow, 1995]), implique, avec l'hypothèse d'une élasticité de l'utilité marginale de la consommation valant -1, une croissance soutenue à 5%, vision très optimiste du futur, surtout si des impacts négatifs du changement climatique venaient à infléchir ce sentier de croissance.

II.3.2 Rôle ambivalent des inerties socio-économiques

Les systèmes socio-économiques sont caractérisés par une forte inertie en ce sens qu'une modification rapide de leur dynamique - comme de passer d'un mode de développement fondé sur le primat des énergies fossiles à un mode alternatif laissant davantage de place aux énergies renouvelables - nécessite beaucoup plus d'efforts qu'une transition graduelle. Des programmes agressifs de réduction des émissions donc, en accélérant le remplacement du capital productif installé (avant son obsolescence naturelle), impliqueraient des coûts plus élevés, les coûts induits par une transition à marche forcée s'ajoutant aux coûts d'exploitation des nouvelles technologies mises en place pour diminuer les émissions de GES. L'existence d'inertie socio-économique favorise donc une transformation graduelle des systèmes énergétiques, à leur rythme de renouvellement naturel ; on aura donc tendance à repousser les efforts de réduction des émissions. Mais, plus le degré d'inertie est important (il est raisonnable de penser qu'une refonte des systèmes énergétiques prendra au moins cinquante ans), plus cette transition doit être entreprise tôt de manière à « écrêter » le pic des coûts. L'équilibre entre ces deux effets, qui jouent tous les deux dans le sens d'un étalement progressif des efforts d'abattement dans le temps, est affaire de vérification empirique mais la plupart des études indiquent que pour un objectif de stabilisation à 550ppm, la balance penche plutôt dans le sens d'un recul des efforts.

Dans le cadre des politiques climatiques, quelles sont les inerties socio-économiques en jeu ? Celles du secteur énergétique bien sûr. Cependant, l'évolution des systèmes énergétiques ne se construit pas que de l'intérieur, par une réforme des équipements et la réorientation de l'offre vers des énergies à faible contenu carbone, dont les temps de rotation s'échelonnent de 5 à 50 ans : elle répond également aux sollicitations de la demande, dont certains déterminants créent finalement des inerties beaucoup plus importantes. [Jaccard, 1997] distingue ainsi trois niveaux différents d'inertie socio-économique auxquels sont associés des temps caractéristiques croissants :

- Les petits équipements particuliers (du réfrigérateur à la voiture), dont les temps de retour excèdent rarement 20 ans. Une des questions essentielles est celle de l'orientation des décisions d'achat du ménage, au moment du renouvellement d'un équipement donné, pour accélérer la transition dans le sens d'un appareil moins consommateur d'énergie ou plus respectueux de l'environnement. Les signaux prix (subventions pour le choix de tel équipement de chauffage, taxe sur l'essence, etc.)

ou la qualité de l'information délivrée (labels) peuvent jouer un grand rôle sur ce point et permettre de lutter contre une relative inertie des comportements [AIE/IEA, 2003].

- Les équipements industriels, dont les temps de retour se comptent en décennies. A l'exception des industries grosses consommatrices d'énergie, les coûts énergétiques ne seront qu'un paramètre de décision parmi d'autres dans les choix de développement.
- L'aménagement du territoire et la planification des tissus urbains, choix d'infrastructures déterminant pour longtemps la demande de mobilité (selon la densité du peuplement et la répartition des centres d'activité, des lieux d'habitation et de loisir) et les dominances relatives des différents modes de transport envisageables. Il peut s'agir de mesures explicites (percée d'autoroutes, construction du TGV, implantation d'aéroports, aménagement de pistes cyclables, transports en commun en site propre, articulation entre véhicule particulier et transport en commun) ou de mesures implicites comme les décisions en matière de logement social qui peuvent impliquer un éclatement du tissu urbain.

Finalement, les déterminants de la demande d'énergie vont dépendre de l'interaction entre ces trois niveaux, dont on a souligné l'importance comme phénomènes structurels aux tendances lourdes (évolution des modes de vie, croissance de la population et besoins de transport). Ainsi, les inerties socio-économiques dépassent de loin les seules inerties du secteur énergétique et dépendent de facteurs sur lesquels il peut être très difficile d'intervenir, une fois que certaines décisions ont été prises. On touche là à l'irréversibilité des choix.

II.3.3 Nature et orientation du progrès technique

L'effet du progrès technique se traduit par une diminution des coûts d'abattement avec le temps (car les équipements deviennent plus performants et consomment moins d'énergie pour produire un même volume de bien ou car les énergies alternatives deviennent moins coûteuses et peuvent être adoptées plus facilement), diminution d'autant plus prononcée que son rythme de pénétration est élevé. Comme le taux d'actualisation, il influence donc la stratégie optimale en repoussant les efforts d'abattements vers le futur : il vaut mieux attendre pour bénéficier des innovations.

Cependant une telle analyse repose sur le postulat d'un progrès technique autonome, une manne du ciel, s'accroissant régulièrement avec le temps. Une analyse plus fine qui cherche à représenter par quels canaux apparaissent et se diffusent de nouvelles techniques n'aboutit pas nécessairement à une telle conclusion. Il convient ici de distinguer deux mécanismes : la R&D, c'est à dire un investissement vers le futur, et le *Learning by doing*, dont la dynamique dépend naturellement de la trajectoire d'efforts d'abattement suivie jusque là.

Dans le cas d'un progrès technique selon un processus de R&D, [Goulder et Mathai, 2000] ont ainsi montré qu'il est légitime de reporter en partie les efforts vers le futur : les coûts futurs étant plus faibles que les coûts présents du fait de l'innovation, il est économiquement efficace de reporter l'essentiel des efforts. En revanche, l'impact sur la trajectoire optimale d'abattement d'un progrès technique de type *Learning by doing* reste ambigu : entreprendre des efforts dès aujourd'hui s'avère fructueux puisque l'apprentissage contribue à faire baisser les coûts futurs

mais il s'opère un équilibre entre action présente (qui favorise la baisse des coûts futurs) et action future (qui bénéficie de la baisse de ces coûts). De manière plus générale, un certain nombre d'études indiquent cependant « *early emissions-reduction measures are preferable when Learning by Doing is considered* » ([Metz et al., 2001], § 8.4.5.2). L'analyse de Goulder et Mathai souligne par ailleurs, à partir d'exemples numériques, que l'effet du progrès technique endogène sur les *coûts globaux* des politiques climatiques est particulièrement important dans un cadre coût-efficacité (les politiques de stabilisation par exemple) mais que son impact sur le *timing* y est relativement plus faible.

La question de l'impact de la nature et de l'orientation du progrès technique sur le profil temporel des efforts d'abattement est cependant loin de recevoir une réponse claire (voir [Metz et al., 2001] (§ 8.4.5) pour une revue) car elle est très dépendante de la nature des modèles et des hypothèses embarquées (nature des firmes, nature des marchés de la R&D et origine du financement de cette activité, secteurs étudiés) et des données pour les applications numériques. Sur ce point, le message-clé avec lequel souhaite conclure le GIEC dans son dernier rapport est la distinction logique entre le timing des efforts d'abattement et le timing de la décision en matière de changement climatique. Compte tenu du temps long nécessaire aux innovations pour se développer et compte tenu de possibles irréversibilités dans les itinéraires de développement technico-économiques (verrouillage dans une configuration où la demande de mobilité est importante et où le transport routier est dominant, par exemple), une question essentielle est celle des signaux politiques à émettre pour orienter et soutenir les développements techniques dans le sens approprié, par exemple une refonte de la fiscalité de manière à encourager l'émergence des nouvelles énergies renouvelables pour préparer leur future adoption.

Quelle est la résultante de ces trois déterminants sur la trajectoire optimale d'émissions, l'objectif ultime étant connu dès aujourd'hui ? Jeu de l'actualisation - qui traduit le fait que nos descendants seront plus riches que nous et qu'une même dépense ne pèsera pas autant sur leur bien-être ; inertie du capital existant, qu'il est coûteux de remplacer de manière prématurée, et lenteur à modifier les comportements de consommation ; temps long pour faire pénétrer les innovations, il n'y a pas d'urgence à entreprendre des efforts significatifs dès aujourd'hui, sauf dans le cas où le plafond de concentration est très proche des niveaux actuels.

Ainsi, [Manne et Richels, 1999] concluent par exemple en insistant sur les inerties socio-économiques et le temps nécessaire au développement d'alternatives énergétiques à bas coût : *"... unless the concentration target for CO₂ is well below 550 ppmv, the Protocol appears to be inconsistent with a cost-effective long-term strategy for stabilizing CO₂ concentrations. Rather than requiring sharp near-term reductions, it appears that a more sensible strategy would be to make the transition at the point of capital stock turnover. This would eliminate the need for premature retirement of existing plant and equipment and would provide the time that is needed to develop low-cost, low carbon substitutes"*. Pour autant, les auteurs de telles analyses insistent pour que leur résultats ne soient pas interprétés comme justifiant l'attentisme : s'il apparaît comme économiquement rationnel de retarder l'essentiel de la transition entre nos profils énergétiques et socio-techniques actuels et des sociétés à bas profil d'émissions et à faible contenu carbone, un certain nombre d'actions pour préparer et faciliter cette transition doivent être entreprises sans délai : renforcement des investissements en R&D dans le domaine des renouvelables, remplacement progressif, quand elles arrivent à maturité, des unités productives, dans le sens d'une structure moins intensive en carbone, mesures sans regret dans les secteurs du bâtiment et des transports ...

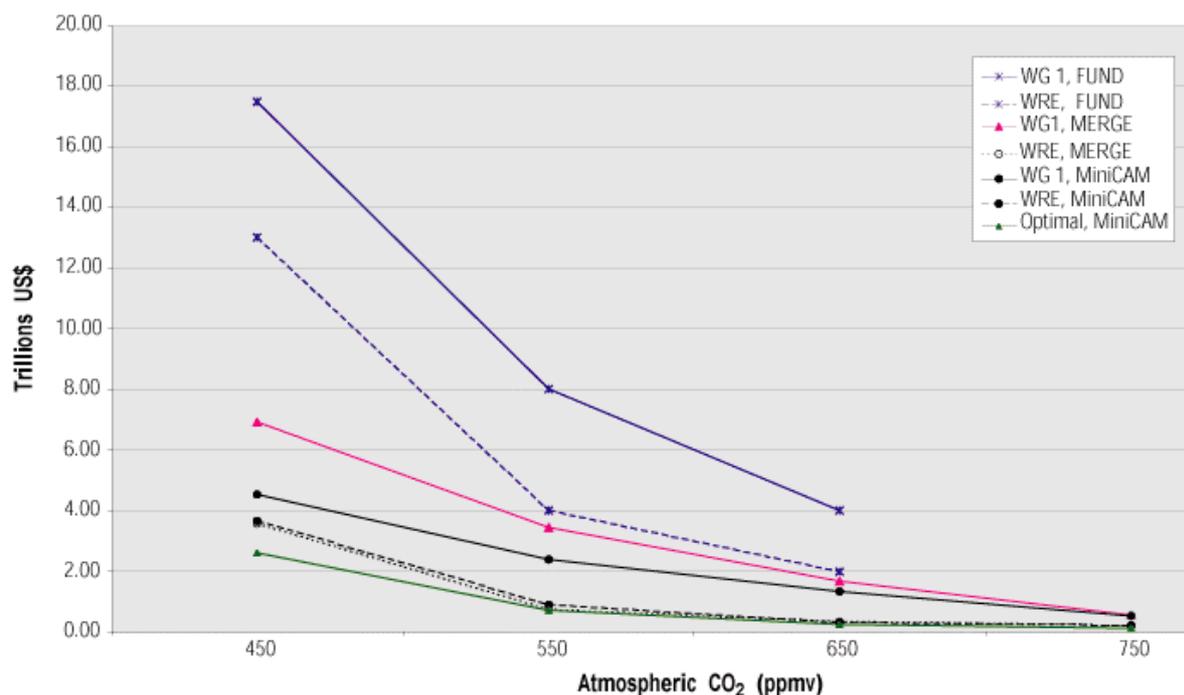


Figure III-3. Comparaison des coûts actualisés (à 5% par an) des trajectoires WGI et WRE pour différents plafonds de stabilisation de la concentration atmosphérique de CO₂ : résultats de trois modèles intégrés.

Quel que soit le modèle utilisé, il est toujours moins coûteux de reporter l'action : les trajectoires WRE sont toujours moins coûteuses que les trajectoires WGI. En valeur relative, cette différence s'accroît de manière générale plus la cible de stabilisation est élevée. Sans surprise, les coûts décroissent rapidement quand on relâche la contrainte environnementale mais cette tendance n'est pas régulière : elle est particulièrement prononcée entre 450 et 550 ppm où les coûts varient dans l'ensemble d'un facteur 2. Toute information sur les bénéfices d'une stabilisation à 450ppm ou à 550ppm est ainsi particulièrement précieuse mais nous avons vu au chapitre premier qu'elle n'était pour le moment pas disponible. Source : [Metz et al., 2001], fig. 8.15.

II.4. Regret environnemental et regret économique : l'apport de la décision séquentielle

Ainsi, quelle que soit la cible de long-terme, tout semble indiquer qu'il n'est pas nécessaire d'opérer dès aujourd'hui une transition massive vers des sociétés à bas profil d'émissions, même s'il est important de la préparer. Mais cette façon de raisonner néglige le fait que l'on ignore aujourd'hui quelle est la cible ultime à adopter. Or en demeurant sur des trajectoires de croissance et de développement relativement émettrices (puisque l'on repousse l'essentiel des efforts), il faudra peut-être accélérer brutalement les mesures de réduction des émissions de GES et cette transition à marche forcée ne se fera pas sans coûts additionnels du fait des inerties socio-économiques. Peut-être apprendra-t-on dans vingt ans que l'on peut sans problème atteindre les 650 ppm et dans ce cas, il n'y avait pas d'urgence à agir. Au contraire, les signes avant-coureurs du changement climatiques et de ses conséquences socio-économiques seront peut-être suffisamment inquiétants pour que l'on essaie de rester en dessous de 450 ppm et dans ce cas, toute accélération des efforts pour sauter d'une trajectoire intensive en carbone à une trajectoire peu émettrice se traduira par des coûts supplémentaires d'autant plus importants

que les inerties socio-économiques seront significatives et que l'on aura retardé le moment de cette transition.

Dans la pratique, comme le notent [Hourcade et Chapuis, 1995], on peut penser qu'il sera cependant préféré à un freinage violent au coût élevé un dépassement temporaire des contraintes environnementales ; c'est à dire qu'il existe pour chaque cible de concentration une fenêtre de tir qui se ferme progressivement plus on retarde l'action, à la fois en raison de l'accumulation graduelle des GES dans l'atmosphère et en raison des inerties techniques, sociales et économiques qui font croître significativement le coût de toute action brutale. Ainsi, c'est en raison de l'existence d'inerties socio-économiques et de potentielles irréversibilités dans les sentiers de développement (verrouillages dans une configuration très émettrice) qu'incertitudes de long-terme (choix de la cible de stabilisation) et incertitudes de court-terme (choix de la trajectoire d'émissions sur laquelle on s'engage) ne sont pas aussi indépendantes que l'on pourrait le croire d'après les analyses développées à la suite de l'article séminal de WRE.

Dès lors, toute décision de court-terme correspond à un arbitrage entre "*the economic risks of rapid abatement now (that premature capital stock retirement will later be proven unnecessary), against the corresponding risks of delay (that more rapid reduction will then be required, necessitating premature retirement of future capital)*" ([Bruce et al., 1996], SPM). Pour étudier le jeu croisé de l'inertie socio-économique et de l'incertitude sur l'objectif de long-terme et savoir lequel des deux risques l'emporte sur la décision de court-terme, [Ha Duong et al., 1997] comparent les niveaux d'abattement pour les premières décennies du XXI^{ème} siècle dans deux situations : la première, où l'on vise dès aujourd'hui la cible 550ppm, et la seconde, où l'on vise en espérance cette même valeur - l'information permettant de choisir l'objectif de stabilisation étant dévoilée plus tard (en 2020 ou en 2035). Dans les deux cas, les spécifications de la fonction de coût d'abattement rendent compte des inerties socio-économiques, sous forme d'un facteur multiplicatif : plus l'accélération des efforts est importante, plus les coûts s'en trouvent relevés¹².

Dans la seconde configuration, on se situe explicitement dans l'optique d'une décision séquentielle : il n'est plus question de choisir une trajectoire d'émissions qui satisfasse un objectif de stabilisation donné, connu avec certitude, mais de déterminer quelle décision de court-terme permet de préserver au mieux des marges de manœuvre futures, compte tenu d'une amélioration des connaissances sur les bénéfices des politiques climatiques. Plus précisément, c'est l'équilibre entre une action précoce, qui cherche à préserver les options de stabilisation à plus bas niveau et peut s'avérer inutilement coûteuse si l'on apprend finalement que l'on peut viser une cible beaucoup moins contraignante, et une action plus tardive, qui, si l'on apprend qu'il est en fait souhaitable de retenir un objectif comme 450ppm, entraînera des coûts de transition élevés compte tenu de l'existence d'inerties socio-économiques et du retard accumulé. Les décisions d'abattement pour les décennies à venir sont donc un arbitrage entre regrets d'une action précoce (coûts irrécupérables d'efforts enclenchés trop tôt) et regrets d'une action trop tardive (surcoûts de la transition à marche forcée)¹³. Les pondérations qui sont

¹² Le calibrage du facteur inertie de la fonction de coût est effectué de manière que les niveaux d'abattement pour les premières décennies du XXI^{ème} calculés par le modèle DIAM pour la cible 550ppm en univers certain soient identiques à ceux obtenus par WRE pour cette même cible (le scénario de référence étant dans tous les cas de figure le scénario IS92a).

¹³ On doit noter qu'à court-terme, les différentes options de stabilisations (même les plus contraignantes) ne sont pas encore menacées si on retarde les efforts, ce qui n'est plus le cas à moyen- et long-terme. C'est donc bien l'impact de l'inertie socioéconomique sur la décision de court-terme que l'on mesure ici et non pas celui des irréversibilités naturelles liées à l'accumulation des GES.

attachées à chacune des cibles (ici, équiprobabilité entre 450ppm, 550ppm et 650 ppm) peuvent être interprétées soit comme un jeu de probabilités subjectives employé par le décideur à partir des informations scientifiques en sa possession¹⁴, soit comme trois demandes sociales contrastées exprimées avec une égale intensité auprès de ce même décideur.

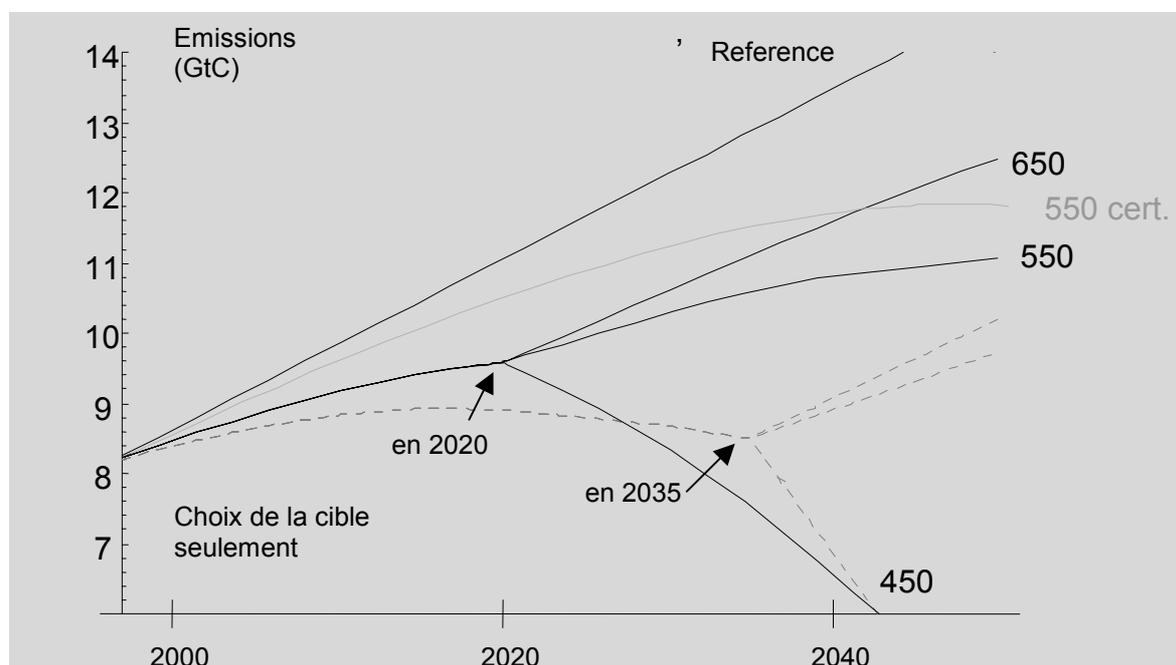


Figure III-4. Stratégie optimale en décision séquentielle.

En univers certain, à une stabilisation à 550 ppm correspond en 2020 un effort de réduction d'émissions de 7% par rapport aux émissions de référence (courbe trait plein gris clair). En présence d'incertitude, cet effort passe à 14 % si le niveau de stabilisation visé vaut en espérance 550 ppm (équiprobabilité entre les trois cibles) et si l'incertitude est résolue en 2020 (courbe trait plein noir). Si l'incertitude n'est résolue qu'en 2035, alors le découplage immédiat doit être encore plus fort : l'effort représente maintenant 21% (courbe pointillé gris clair). Source : [Ha Duong, 1998a], fig 6.6.

Les résultats sont présentés Figure III-4. En univers certain, à une stabilisation à 550ppm correspond en 2020 un effort de réduction des émissions de 7% par rapport aux émissions de référence ; c'est bien d'un effort modeste qu'il s'agit : une inflexion des émissions de référence (qui restent toujours croissantes) mais pas le renversement d'une tendance (avec des émissions décroissantes) comme le stipule le Protocole de Kyoto. En présence d'incertitude sur l'objectif de long-terme, cet effort passe à 14 % si le niveau de stabilisation visé vaut en moyenne 550 ppm (croyance *ex ante* égale pour chacune des trois cibles) et si l'incertitude est résolue en 2020. Si l'incertitude n'est résolue qu'en 2035, alors le découplage immédiat doit être encore plus fort, l'effort représentant maintenant 21%.

C'est à dire que compte tenu de l'existence d'inerties socio-économiques, les coûts d'une transition rapide pour respecter des objectifs éventuellement finalement contraignants sont plus importants que les regrets éventuels d'une action précoce ; la balance penche donc dans le sens d'une action précoce pour minimiser les risques pour l'environnement et les systèmes

¹⁴ Et dans ce cas, compte tenu des très grandes incertitudes sur les bénéfices des politiques de stabilisation des concentrations atmosphériques des GES, on peut voir dans cette affectation de trois probabilités égales à trois événements différents une application du Principe de raison insuffisante par le décideur. C'est également l'application de ce principe qui peut justifier que les scénarios SRES soient jugés (à tort) 'equally sound' et que 'there is no single, likely central or best-guess scenario'.

économiques. Une analyse de sensibilité sur le degré d'inertie socio-économique (mesuré ici comme le temps de rotation du capital émetteur installé, qui vaut respectivement 20 ou 50 ans) montre que l'amplitude du décrochement croît avec le degré d'inertie socio-économique. Ces résultats indiquent l'importance du dipôle inertie-incertitude sur la décision de court-terme. Sans inertie, il n'y a pas de coût supplémentaire lié à une transition rapide des systèmes énergétiques dans le sens d'une décarbonisation ; l'incertitude n'a donc pas d'importance (dans la mesure où les options de stabilisation les plus strictes ne sont pas menacées) puisque l'on peut sans coût additionnel sauter d'une trajectoire très émettrice à une trajectoire peu émettrice. Sans incertitude, les trajectoires d'émissions à moindre coût sont, nous l'avons vu, celles où l'essentiel des efforts est repoussé vers le futur car il est optimal de les étaler dans le temps. En présence d'incertitude, l'inertie socio-économique joue donc un rôle inverse de celui qu'elle joue en univers certain. Et plus tard l'incertitude sur l'objectif de long-terme est résolue, plus important doit être le découplage à court-terme (car on cherche toujours à préserver les options de stabilisation aux plus bas niveaux) ; la date d'arrivée de l'information est donc un paramètre déterminant pour la décision optimale.

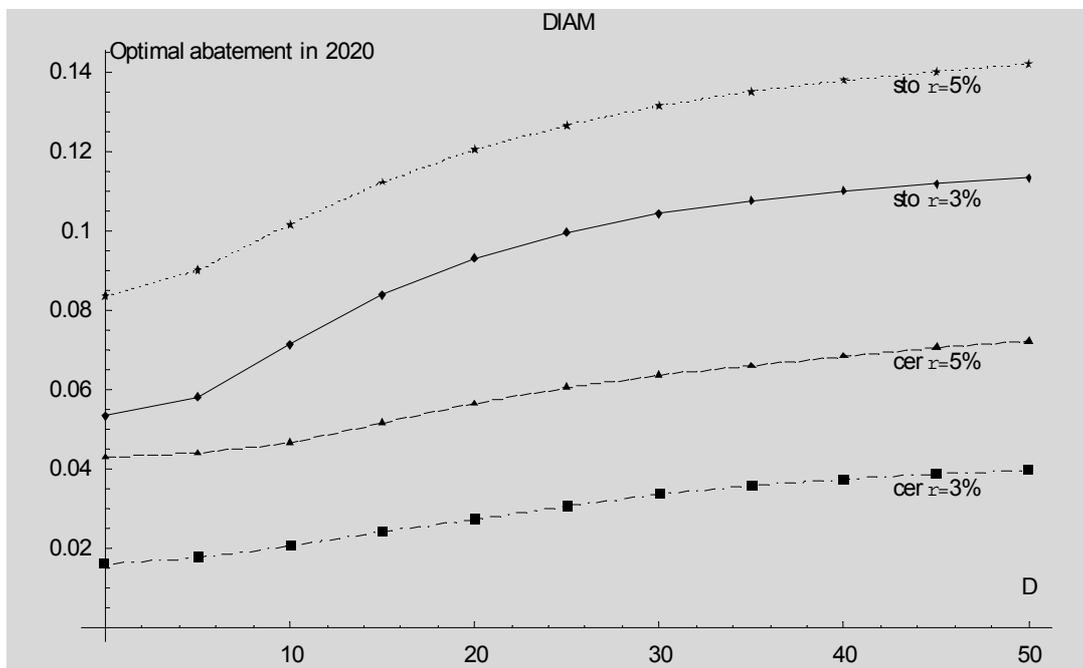


Figure III-5. Influence relative du taux d'actualisation et du degré d'inertie socio-économique sur la décision optimale, en univers certain et en univers stochastique.

Ces courbes représentent le niveau optimal d'abatement en 2020 en fonction du degré d'inertie socio-économique, variant de 0 à 50 ans (en abscisse) et du taux d'actualisation, 3 ou 5%.an⁻¹ (voir chaque courbe), pour une décision en univers certain (on vise dès à présent 550 ppm, indiqué cer.) et pour une décision en univers incertain (équiprobabilité entre 450, 550 et 650 ppm, arrivée de l'information en 2020, indiqué sto). Source : [Ha Duong, 1998a], fig 6.7.

On peut se poser la question de l'impact du taux d'actualisation sur le profil temporel des efforts d'abatement : en univers incertain, joue-t-il toujours (comme en univers certain) en faveur d'un report de l'action de quelques décennies ? quelle est son importance relative vis à vis du degré d'inertie socio-économique ? Les résultats sont présentés Figure III-5 : on y compare la décision optimale en 2020 en univers certain et en univers stochastique (2020 est alors la date d'arrivée de l'information) pour deux valeurs du taux d'actualisation (3 et 5%.an⁻¹, respectivement) et plusieurs degrés d'inertie socio-économique (temps de rotation du capital

émetteur installé de 0 à 50 ans). On peut d'abord y retrouver que la réduction optimale en univers stochastique est nettement supérieure à la décision en univers certain (au moins le double) quelle que soit la valeur du taux d'actualisation et du degré d'inertie socio-économique. Surtout, on peut constater qu'en univers incertain, l'inertie prend une importance supplémentaire. Dans le cas certain, l'influence du taux d'actualisation domine celle de l'inertie socio-économique ; en présence d'incertitude en revanche, les résultats sont aussi sensibles au taux d'actualisation qu'au degré d'inertie : les courbes sont beaucoup plus inclinées. Le taux d'actualisation, paramètre fort controversé, n'est donc plus qu'un paramètre parmi d'autres.

En conclusion ces résultats permettent d'illustrer l'importance des inerties socio-économiques en présence d'incertitude dans la question du timing des politiques climatiques : d'un paramètre prêchant en faveur d'un retard des efforts en univers certain, l'inertie socio-économique devient en univers incertain une raison supplémentaire pour une action précoce.

Ils montrent également l'importance du mode d'analyse de l'incertitude, en particulier de ces liens avec la décision. Pour évaluer le bien-fondé d'une action précoce, on est en effet passé d'analyses que l'on pourrait qualifier d'analyses de sensibilité - comparaison des trajectoires optimales d'émissions pour différentes options de stabilisation des concentrations atmosphériques des GES - à des analyses de décision sous incertitudes - où l'on prend en compte l'ensemble des croyances sur les futurs possibles dans le processus de décision. Nous venons de voir comment les recommandations pour l'action (agir ou attendre) et les conclusions que l'on pouvait tirer de l'importance relative de différents paramètres sur la décision optimale (taux d'actualisation *vs.* inertie socio-économique) pouvaient être modifiées entre ces deux analyses.

Enfin ils montrent l'importance d'un cadre d'analyse de la décision qui intègre l'amélioration possible des connaissances futures, c'est à dire d'un cadre où l'action peut devancer l'arrivée d'informations conformément à l'optique du Principe de Précaution. Si on ne prend pas en compte l'arrivée d'information (ou si elle arrive très tard), le résultat optimal n'est pas très éloigné d'une trajectoire compatible avec une stabilisation à 450ppm. En revanche, si on prend en compte la réduction graduelle des incertitudes et plus elle se produit tôt, plus on gagne en flexibilité (en restant avec une trajectoire en dessous de 550ppm en certain).

Ce faisant, en adoptant un mode de décision séquentielle, on sépare les différents temps de la décision et on associe à chaque fenêtre les incertitudes qui lui sont cruciales. On peut ainsi hiérarchiser les incertitudes et surmonter en partie les controverses, par exemple en montrant que dans le cadre de ce modèle le taux d'actualisation n'est plus qu'un paramètre parmi d'autres. De même, en représentant différentes croyances a priori inconciliables à court-terme, on arrive à dépasser des oppositions très marquées qui pourraient paralyser tout accord de court-terme.

Conclusion

Ce chapitre s'est ouvert sur la nécessité d'adopter l'approche séquentielle à la décision comme cadre d'analyse des politiques climatiques pour surmonter le risque d'une paralysie de l'action ou d'une action inappropriée face aux menaces encore incertaines du changement climatique. Effectivement, en replaçant les termes du débat dans une perspective temporelle, temporalité des décisions et temporalité de l'arrivée de nouvelles connaissances, i) elle relie l'incertitude sur les chemins futurs (les risques de long-terme) aux choix présents, elle permet donc d'envisager différentes croyances sur le long-terme ; ii) compte tenu de ces différents risques (impacts du changement climatique irréversibles (regrets environnementaux), investissements irrécupérables dans les mesures d'abatement (regrets économiques), *etc.*), elle permet d'identifier les décisions qui préservent le mieux les options futures, elle introduit donc une préférence pour la flexibilité ; iii) elle identifie plusieurs nœuds de décision et permet de clarifier à chacun de ces nœuds les incertitudes qui y sont déterminantes, autrement dit de les hiérarchiser. C'est donc un cadre d'analyse qui intègre les deux composantes du Principe de précaution, la flexibilité et un contexte d'information croissante, et permet de surmonter certaines controverses en considérant diverses croyances et en hiérarchisant leur impact sur la décision.

Son application à l'examen des politiques de stabilisation des concentrations atmosphériques des GES à long-terme en a été un premier exemple, en montrant comment un processus de décision séquentielle permettait de dépasser les débats sur les choix d'une cible de stabilisation pour les décisions des années à venir : en envisageant différentes croyances sur les bénéfices de ces politiques (croyances qui conduisent à adopter des cibles différentes dès aujourd'hui) et en considérant que des connaissances scientifiques permettront d'effectuer ce choix plus tard, on aboutit en effet à un accord de court-terme. Pour préserver les options de stabilisation les plus contraignantes, on est amené à faire plus d'efforts de court-terme et ce d'autant plus que les inerties socio-économiques sont importantes ou que l'information sur l'objectif ultime des politiques climatiques est découverte tard. Les recommandations du modèle vont donc dans le sens du Principe de précaution. La prise en compte de l'arrivée d'information dans le processus de décision permet cependant de suivre une trajectoire d'abatement moins intense que si on ne tient pas compte des progrès des connaissances.

Les plafonds de concentration sont la mesure la plus immédiate pour examiner des politiques alternatives de protection de l'atmosphère. Néanmoins, elles court-circuitent beaucoup de caractéristiques des risques climatiques et des incertitudes au long de la chaîne causale qui va des émissions de GES aux dommages, éléments qui sont rassemblés de manière implicite dans des plafonds de concentration au terme d'un jugement holistique sur ce qu'un changement climatique *dangereux* veut dire. Ce sont ces différents éléments que nous allons progressivement examiner, en nous intéressant à des mesures des risques climatiques de plus en plus tangibles, jusqu'à cette mesure idéale que sont les fonctions de dommages, et en considérant explicitement la combinaison des incertitudes dans leur évaluation. En suivant une approche séquentielle, nous pourrions comparer les recommandations politiques issues des modèles de plus en plus complexes qui utilisent ces différentes mesures des bénéfices des politiques climatiques : faut-il ou non agir à court-terme ?; quelles sont les incertitudes importantes pour cette fenêtre de décision ?; comment se hiérarchisent les incertitudes sur les scénarios d'émissions, sur la dynamique du climat et sur la vulnérabilité des écosystèmes et des activités et implantations humaines ?

Références bibliographiques

- AIE/IEA (2003). *Cool appliances: Policy strategies for energy-efficient homes*, 231 p, AIE/IEA, Paris.
- Arrow, K.J. (1995). Effet de serre et actualisation, *Revue de l'Energie* (471), 631-636.
- Arrow, K.J. et A.C. Fisher (1974). Environmental preservation, uncertainty and irreversibility, *Quarterly Journal of Economics*, 88 (1), 312-319.
- Balvers, R. et T. Cosimano (1990). Active learning about demand and the dynamics of price adjustment, *The Economic Journal*, 100, 882-898.
- Bishop, A.B. (1986). Resource valuation under uncertainty: theoretical principles for empirical research, in *Advances in applied micro-economics*, V.K. Smith (dir.), JAI Press, Greenwich (CT).
- Bruce, J.P., H. Lee et E.F. Haites (dir.) (1996). *Climate change 1995: Economic and social dimensions of climate change. Contribution of Working Group III to the Second Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, Cambridge University Press, Cambridge (UK&US).
- Chichilnisky, G. et G. Heal (1993). Global Environmental Risks, *Journal of Economic Perspectives*, 7 (4), 65-86.
- Cicchetti, C.J. et A.M. Freeman (1971). Option demand and consumer's surplus: further comment, *Quarterly Journal of Economics*, 85 (3), 528-539.
- EMF (1997). *EMF-14: Integrated Assessment of Climate Change*. Energy Modelling Forum, Stanford University, Stanford (CA).
- EMF (1999). *EMF-16: Economic and Energy System Impacts of the Kyoto Protocol: Results from the Energy Modelling Forum Study*. Energy Modelling Forum, Stanford University, Stanford (CA).
- Fisher, A.C. et M. Hanemann (1986). Option value and the extinction of species, in *Advances in applied micro-economics*, V.K. Smith (dir.), p 169-190, JAI Press, Greenwich (CT).
- Fisher, A.C. et M. Hanemann (1987). Quasi-option value: some misconception dispelled, *Journal of Environmental Economics and Management*, 14, 183-190.
- Goulder, L.H. et K. Mathai (2000). Optimal CO₂ Abatement in the Presence of Induced Technological Change, *Journal of Environmental Economics and Management* (39), 1-38.
- Grésillon, J.-M. (2003). L'effet des inondations, aspects hydrauliques de la vulnérabilité, Actes du colloque *Les élus face aux risques climatiques*, ONERC (org.), Muséum d'Histoire Naturelle (Paris), 23-24 juin 2003.
- Ha Duong, M. (1998a). *Comment tenir compte de l'irréversibilité dans l'évaluation intégrée du changement climatique?*, Thèse de Doctorat, Analyse et politique économique, Ecole des Hautes Etudes en Sciences Sociales (EHESS), Paris.
- Ha Duong, M. (1998b). Quasi-option value and climate policy choices, *Energy Economics*, 20, 599-620.
- Ha Duong, M., M. Grubb et J.C. Hourcade (1997). Influence of socioeconomic inertia and uncertainty on optimal CO₂-emission abatement, *Nature*, 390, 270-274.
- Ha Duong, M., J.C. Hourcade et F. Lecocq (1999). Dynamic consistency problems behind the Kyoto Protocol, *International Journal of Environment and Pollution*, 11 (4), 426-446.
- Hallegatte, S. (2003). Assessing the Climate-Economy Feedback through Characteristic Time Interplays, *submitted to Journal of Economic Dynamics and Control*.

- Hammit, J.K. (1999). Evaluation endpoints and climate policy: atmospheric stabilisation, benefit-cost analysis and near-term green-house gas emissions, *Climatic Change*, 41, 447-468.
- Hanemann, M. (1989). Information and the concept of option value, *Journal of Environmental Economics and Management*, 16, 23-37.
- Henry, C. (1974). Investment decisions under uncertainty: the irreversibility effect, *American Economic Review*, 64, 1006-1012.
- Houghton, J.T., Y. Ding, D.J. Griggs, P.J. Noguera, P.J. van der Linden, X. Dai, K. Maskell et C.A. Johnson (dir.) (2001). *Climate change 2001: the scientific basis. Contribution of Working Group I to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, Cambridge University Press, Cambridge (UK&US).
- Hourcade, J.C. (1997). Précaution et approche séquentielle de la décision face aux risques climatiques de l'effet de serre, in *Le principe de précaution dans la conduite des affaires humaines*, A. Godard (dir.), p 259-294, MSH/INRA, Paris.
- Hourcade, J.C. (1998). Débat autour du principe de précaution, *Natures, Sciences, Sociétés*, 6(1), 41-45.
- Hourcade, J.C. et T. Chapuis (1995). No-regret potentials and technical innovation, *Energy Policy*, 23 (4/5), 433-445.
- Jaccard, M. (1997). *Heterogeneous Capital Stocks and Decarbonating the Atmosphere: Does Delay Make Cents?*, 37 p. School of Resource and Environmental Management, Simon Fraser University.
- Kelly, D. et C.D. Kolstad (1999). Bayesian learning, growth, and pollution, *Journal of Economic Dynamic and Control*, 23, 491-518.
- Kelly, D., C.D. Kolstad, M.E. Schlesinger et N.G. Andronova (2000). Learning About Climate Sensitivity From the Instrumental Temperature Record.
- Kolstad, C.D. (1996a). Fundamental irreversibilities in stock externalities, *Journal of Public Economics* (60), 221-233.
- Kolstad, C.D. (1996b). Learning and stock effects in environmental regulation: the case of greenhouse gas emissions, *Journal of Environmental Economics and Management* (31), 1-18.
- Lave, L.B. et H. Dowlatabadi (1993). Climate Change: The Effects of Personal Beliefs and Scientific Uncertainty, *Environ. Sci. Technol.*, 27 (10), 1962-1972.
- Lecocq, F. et J.C. Hourcade (2003). Incertitude, irréversibilités et actualisation dans les calculs économiques sur l'effet de serre, in *Les enjeux économiques de l'effet de serre*, R. Guesnerie (dir.), p 177-199, La Documentation Française, Paris.
- Manne, A.S. et R. Richels (1992). *Buying Greenhouse Insurance: The Economic Cost of CO₂ Emissions limits*, MIT Press, Cambridge (MA).
- Manne, A.S. et R. Richels (1999). The Kyoto Protocol: a cost-effective strategy for meeting environmental objectives?, *The Energy Journal, Kyoto Special Issue*, 1-25.
- Mégie, G. (1997). Incertitude scientifique et décision politique: le cas "historique" de l'ozone stratosphérique, in *Le principe de précaution dans la conduite des affaires humaines*, A. Godard (dir.), p 215-244, MSH/INRA, Paris.
- Metz, B., D. Ogunlade, R. Swart et J. Pan (dir.) (2001). *Climate Change 2001: Mitigation. Contribution of Working Group III to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, Cambridge University Press, Cambridge (UK & US).

- Nakicenovic, N. (dir.) (2000). *Special Report on Emissions Scenarios: a special report of Working Group III of the Intergovernmental Panel on Climate change*, Cambridge University Press, Cambridge (UK&US).
- Newell, R.G. et A.W. Pizer (2001). *Discounting the benefits of climate change mitigation*, 37 p, Pew Center on Global Climate Change, Washington DC.
- Nordhaus, W. et D. Popp (1997). What is the value of scientific knowledge?, *The Energy Journal*, 18 (1), 1-45.
- Peck, S. et T. Teisberg (1993a). Global warming uncertainties and the value of information: an analysis using CETA, *Resources and Energy Economics*, 15 (1), 71-97.
- Peck, S. et T. Teisberg (1993b). The importance of nonlinearities in global warming damage costs, Actes du colloque *Assessing surprises and nonlinearities in greenhouse warming*, J. Darmstadter et M.A. Toman (org.), RFF, Washington D.C., May 1993.
- Peck, S.C. et J.T. Teisberg (1996). Uncertainty and the value of information with stochastic losses from global warming, *Risk Analysis*, 16 (2), 227-235.
- Schmalensee, R. (1972). Option demand and consumer's surplus: valuing price changes under uncertainty, *American Economic Review*, 62, 813-824.
- Treich, N. (1997). Vers une théorie économique de la précaution ?, *Risques*, 32.
- Treich, N. (2000). Décision séquentielle et Principe de Précaution, *Cahiers d'économie et de sociologie rurales* (55-56), 5-24.
- Ulph, A. et D. Ulph (1997). Global warming, irreversibility and learning, *The Economic Journal*, 107, 636-650.
- UNFCCC (1992). Convention-cadre des Nations Unies sur les changements climatiques (UNFCCC).
- Webster, M. (2002). The Curious Role of "Learning" in Climate Policy: Should We Wait For More Data?, *The Energy Journal*, 23 (2), 97-119.
- Weisbrod, B. (1964). Collective-consumption services of individual-consumption goods, *Quarterly Journal of Economics*, 78, 471-477.
- Wigley, T.M.L., R. Richels et J.A. Edmonds (1996). Economic and environmental choices in the stabilization of atmospheric CO₂ concentrations, *Nature*, 379, 240-243.

Chapitre IV

Incertitude sur la sensibilité du climat,
sur le seuil et le rythme critiques de réchauffement :
Leçons du modèle *RESPONSE_Θ*

CHAPITRE IV INCERTITUDE SUR LA SENSIBILITE DU CLIMAT, SUR LE SEUIL ET LE RYTHME CRITIQUES DE RECHAUFFEMENT : LEÇONS DU MODELE RESPONSE_Θ	157
I. Incertitude sur la sensibilité du climat et politique climatique optimale : historique et état des lieux	164
II. RESPONSE_Θ : un modèle d'optimisation inter-temporelle des politiques climatiques sous contraintes d'évolution du climat	170
II.1. Module économique : coût de réduction des émissions et émissions de référence ...	171
II.1.1. Fonction de coût d'abattement.....	171
II.1.2. Scénario de croissance de référence : population mondiale, PIB global et émissions de référence	175
II.2. Modèle du cycle du carbone : un modèle linéaire à trois réservoirs	176
II.3. Modèle d'évolution de la température	178
II.3.1. Forçage radiatif	180
II.3.2. Evolution de la température	181
II.3.3. Sensibilité du climat et incertitudes	183
II.3.4. Calibrage du modèle	185
II.3.5. Validation du modèle climatique	189
II.4. Objectif d'optimisation	189
III. Analyse de sensibilité du modèle RESPONSE_Θ - réponse optimale en univers certain	191
III.1. Réponse optimale du modèle et taux d'actualisation.....	191
III.2. Réponse optimale du modèle et inerties socio-économiques.....	193
III.3. Réponse optimale du modèle et progrès technique autonome	195
III.4. Réponse optimale du modèle et sensibilité du climat	197
III.5. Réponse optimale du modèle et influence des contraintes environnementales.....	200
III.5.1. Impact du seuil de réchauffement sur la décision optimale	201
A. Entre plafond de concentration et seuil de réchauffement : une inertie naturelle supplémentaire, celle de l'océan.....	201
B. Seuil de réchauffement et réponse optimale du modèle.....	204
III.6. Influence croisée des deux contraintes climatique sur la décision optimale	205
IV. Politiques climatiques de précaution : leçons du modèle RESPONSE_Θ	209
IV.1. Politique climatique de précaution en présence d'incertitude sur la sensibilité du climat.....	209
IV.1.1. En présence d'incertitude sur la sensibilité du climat, une stratégie de précaution très contraignante à court-terme	212
IV.1.2. Le rôle crucial de la contrainte de rythme	215
IV.1.3. Valeur de l'information sur la sensibilité du climat.....	218
A. Valeur de l'information et degré d'inertie socio-économique	219
B. Valeur de l'information et contraintes sur l'amplitude et le rythme du réchauffement	221
C. Valeur de l'information et croyances sur la sensibilité du climat.....	223
IV.2. Politique climatique de précaution en présence d'incertitude sur le niveau critique de réchauffement.....	226
IV.3. Politique climatique de précaution en présence d'incertitude sur le rythme critique de réchauffement.....	230
IV.4. Conclusion.....	233
Conclusion	235
Références bibliographiques	237

Table des figures

Figure IV-1. Trajectoires d'émissions de CO ₂ et incertitude sur la dynamique du climat.....	165
Figure IV-2. Données du calibrage du modèle de température.....	186
Figure IV-3. Calibrage du modèle de température (pas de temps annuel).....	187
Figure IV-4. Calibrage du modèle de température (pas de temps décennal).....	187
Figure IV-5. Comparaison des réponses climatiques <i>RESPONSE</i> , <i>IMAGE</i> et <i>DICE</i>	190
Figure IV-6. Sensibilité de la trajectoire optimale d'abattement au taux d'actualisation.....	192
Figure IV-7. Sensibilité de la trajectoire optimale d'abattement au degré d'inertie socio-économique.....	192
Figure IV-8. Sensibilité de la trajectoire optimale d'abattement au jeu relatif degré d'inertie socio-économique/ taux d'actualisation (taux faible : 1%.an ⁻¹).....	194
Figure IV-9. Sensibilité de la trajectoire optimale d'abattement au jeu relatif degré d'inertie socio-économique/ taux d'actualisation (taux fort : 10%.an ⁻¹).....	194
Figure IV-10. Sensibilité de la trajectoire optimale d'abattement au rythme de pénétration du progrès technique.....	196
Figure IV-11. Sensibilité de la trajectoire optimale d'abattement au jeu relatif taux d'actualisation/degré d'inertie socio-économique/ rythme de pénétration du progrès technique.....	196
Figure IV-12. Correspondance entre seuils de réchauffement et plafonds de concentration en présence d'incertitude sur la sensibilité du climat.....	198
Figure IV-13. Sensibilité de la trajectoire optimale d'abattement à la valeur de la sensibilité du climat (niveau critique de changement climatique, $\Delta\theta_{MAX} : +2 \text{ }^\circ\text{C}$; rythme critique, $\Delta_{RYT} : 0,3 \text{ }^\circ\text{C.décennie}^{-1}$).....	198
Figure IV-14. Influence croisée de la sensibilité climatique et du taux d'actualisation sur la trajectoire optimale d'abattement (niveau critique de changement climatique, $\Delta\theta_{MAX} : +2 \text{ }^\circ\text{C}$; rythme critique, $\Delta_{RYT} : 0,3 \text{ }^\circ\text{C.décennie}^{-1}$).....	199
Figure IV-15. Comparaison des trajectoires optimales de <i>réchauffement</i> pour deux politiques climatiques visant un même objectif de protection à long-terme de l'atmosphère et du climat.....	202
Figure IV-16. Comparaison des trajectoires optimales en <i>concentration</i> pour deux politiques climatiques visant un même objectif de protection à long-terme de l'atmosphère et du climat.....	202
Figure IV-17. Comparaison des trajectoires optimales d' <i>abattement</i> pour deux politiques climatiques visant un même objectif de protection à long-terme de l'atmosphère et du climat.....	203
Figure IV-18. Influence de la contrainte relative à l'amplitude du réchauffement sur la trajectoire optimale d'abattement (rythme critique, $\Delta_{RYT} : 0,3 \text{ }^\circ\text{C.décennie}^{-1}$).....	204
Figure IV-19. Diagramme de phase Amplitude du réchauffement (depuis 1990)/Rythme décennal du réchauffement pour le scénario A1 : <i>RESPONSE</i> , trois valeurs pour la sensibilité du climat, et modèle <i>IMAGE</i>	205
Figure IV-20. Influence croisée des contraintes climatiques sur la réponse optimale du modèle.....	206
Figure IV-21. Influence croisée des contraintes climatiques sur la réponse optimale du modèle, taux d'actualisation à 1%.an ⁻¹	207
Figure IV-22. Politique climatique optimale en suivant une approche séquentielle en présence d'incertitude sur la sensibilité du climat.....	213
Figure IV-23. Influence relative du taux d'actualisation et du degré d'inertie socio-économique sur la décision optimale, en univers certain et en présence d'incertitude avec arrivée d'information.....	214
Figure IV-24. Politique climatique optimale en présence d'incertitude sur la sensibilité du climat quand l'information sur ce paramètre est disponible en 2020, 2040, 2050 ou jamais.....	215
Figure IV-25. Comme pour la Figure IV-24 mais avec $\Delta_{RYT} = 0,2 \text{ }^\circ\text{C.décennie}^{-1}$	217
Figure IV-26. Comme pour la Figure IV-24 mais avec $\Delta_{RYT} = 0,4 \text{ }^\circ\text{C.décennie}^{-1}$	217
Figure IV-27. Valeur de l'information sur la sensibilité du climat en fonction de sa date d'arrivée pour différentes valeurs du degré d'inertie socio-économique (20 ans et 60 ans) et du rythme critique de changement climatique (0,1 ; 0,2 ; 0,3 et 0,4 $^\circ\text{C.décennie}^{-1}$).....	220
Figure IV-28. Valeur de l'information sur la sensibilité du climat en fonction de sa date d'arrivée pour différentes valeurs du niveau critique de réchauffement (+1 ; +2 et +3 $^\circ\text{C}$) et du rythme critique de changement climatique (0,1 ; 0,2 et 0,3 $^\circ\text{C.décennie}^{-1}$).....	221
Figure IV-29. Valeur de l'information sur la sensibilité du climat en fonction de sa date d'arrivée pour différentes croyances <i>a priori</i> sur ce paramètre (niveau <i>critique</i> de réchauffement +2 $^\circ\text{C}$).....	224
Figure IV-30. Politique climatique optimale en présence d'incertitude sur la sensibilité du climat quand l'information sur ce paramètre est disponible en 2020, 2040, 2050 ou jamais.....	225
Figure IV-31. Valeur de l'information sur le niveau <i>critique</i> de réchauffement en fonction de sa date d'arrivée pour différentes valeurs de la sensibilité du climat et du rythme critique de changement climatique.....	229

Figure IV-32. Valeur de l'information sur le rythme *critique* de réchauffement en fonction de sa date d'arrivée pour différentes valeurs de la sensibilité du climat et du niveau critique de changement climatique.....232
 Figure IV-33. Valeur de l'information en fonction de sa date d'arrivée sur la sensibilité du climat, sur le rythme *critique* de réchauffement et sur le niveau *critique* de réchauffement.234

Table des tableaux

Tableau IV-1. Coûts totaux et coûts marginaux du respect des engagements de Kyoto, pour les quatre marqueurs SRES (coûts non actualisés, en 2010).173
 Tableau IV-2. Influence croisée des contraintes climatiques sur les niveaux d'abattement pendant la première moitié du XXI^{ème} siècle.208
 Tableau IV-3. Réponse optimale en 2010 pour différentes incertitudes et les cas certains correspondants.....233

Table des encadrés

Encadré IV-1. Tolerable Windows Approach ou Safe Landing Analysis : deux approches inverses en modélisation intégrée du changement climatique.....168
 Encadré IV-2. Politiques climatiques de précaution en présence d'incertitude sur la sensibilité du climat : évaluation à l'aide du modèle coût-efficacité RESPONSE_Θ.....211
 Encadré IV-3. Politiques climatiques de précaution en présence d'incertitude sur le niveau critique de réchauffement : évaluation à l'aide du modèle RESPONSE_Θ.....227
 Encadré IV-4. Politiques climatiques de précaution en présence d'incertitude sur le rythme critique de réchauffement : évaluation à l'aide du modèle RESPONSE_Θ.....230

Une première réponse aux menaces potentielles des changements climatiques, dans un contexte où les estimations des dommages sont encore très fragiles, a été de rechercher la façon la moins coûteuse de respecter un jeu donné de plafonds de concentration atmosphérique des GES, plafonds qui reflètent diverses croyances sur le niveau de perturbation dangereuse du système climatique et diverses attitudes vis à vis du risque. On a donc recouru à une proxy des dommages climatiques en définissant un seuil de danger au terme d'un 'holistic judgment' [Hammitt, 1999]. Ce jugement, plus ou moins implicite, intègre les connaissances sur l'étendue des dommages et leur incertitude, établit un lien entre niveau de concentration à l'équilibre et dommages les plus significatifs et prend en compte différentes considérations sur la répartition des dommages entre régions et le degré d'aversion au risque des populations. En outre, exprimer les dommages climatiques selon une échelle en concentrations offre l'avantage de pouvoir aisément mettre en parallèle coûts de contrôle des émissions de GES et objectif des politiques climatiques, la seule incertitude à prendre explicitement en compte portant sur le cycle du carbone. Cette démarche se conforme à l'esprit de la Convention Climat [1992] qui retient dans son objectif 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 » et rappelle dans ses principes « que les politiques et mesures [...] requièrent un bon rapport coût-efficacité ».

Dans ce contexte, les questions de tempo de l'action et, en particulier, de la validité des engagements de Kyoto (A quelle date l'essentiel des efforts de réduction des émissions doit-il être enclenché ?) ont nourris de nombreux débats. Dans son troisième rapport d'évaluation [Metz et al., 2001], le GIEC ne donne pas de réponse définitive sur ce point mais expose, au chapitre VIII et au chapitre X, les principaux éléments des controverses entre attentistes et partisans de l'action immédiate : le jeu de l'actualisation, les inerties socio-économiques, la nature et l'orientation du progrès technique, la valeur des plafonds envisagés et l'incertitude. Pour l'essentiel, nous les avons présentés au chapitre précédent pour introduire la problématique de la 'when flexibility' en même temps que les deux contributions majeures qui ont marqué ces débats.

D'un côté, Wigley, Richels et Edmonds [Wigley et al., 1996] ont attiré l'attention sur les gains économiques et sociaux d'un report de l'essentiel des efforts de quelques décennies, en raison de l'inertie du capital existant - qu'il est coûteux de remplacer de manière prématurée -, de la lenteur à modifier les comportements de consommation et à faire pénétrer les innovations, en raison aussi du jeu de l'actualisation - qui traduit le fait que nos descendants seront plus riches que nous et qu'une même dépense ne pèsera pas autant sur leur bien-être. Mais ces résultats ont été obtenus pour des plafonds de stabilisation connus dès aujourd'hui et négligent les coûts d'ajustement des trajectoires d'émissions, imputables aux inerties socio-économiques, si on apprend dans dix, vingt, trente ans ou plus tard, qu'il faut enclencher une décarbonisation massive de nos sociétés pour respecter des plafonds de concentrations finalement contraignants. A l'inverse donc (et c'est l'autre contribution majeure dans ces débats), [Ha Duong et al., 1997] ont montré que pour préserver les options de stabilisation à plus bas niveau, on est amené à faire plus d'efforts de court-terme et ce d'autant plus que les inerties socio-économiques sont importantes (car elles augmentent les coûts d'une réforme rapide des systèmes énergétiques) ou que l'information sur l'objectif ultime des politiques climatiques est découverte tard (car on souhaite préserver toutes les options). Une telle analyse recommande en définitive des efforts à court-terme dans l'ensemble deux fois plus importants que ceux stipulés par [Wigley et al., 1996].

Mais la référence à un objectif de stabilisation à long-terme de la concentration atmosphérique de CO₂ n'est qu'une approximation très grossière du risque climatique puisqu'elle opère un raccourci saisissant au long de la chaîne causale Emissions/Concentrations/Changement climatique/Impacts/Dommages résultants. En particulier, il est impossible de mettre en correspondance concentration atmosphérique de GES stabilisée et niveau de dommages. Par exemple, en raison des incertitudes sur la dynamique du climat, à une concentration (stabilisée) correspond une large gamme de réchauffements potentiels : à titre d'illustration, si la concentration atmosphérique de CO₂ est stabilisée à 550 ppm, la température moyenne globale peut s'élever de + 1,5 °C à 4,5 °C en référence à sa valeur à la période pré-industrielle (c'est à dire une incertitude d'un facteur 3).

En revanche, l'élévation de température moyenne globale constitue un bien meilleur indicateur du risque climatique : d'une part, elle peut servir de mesure synthétique du changement climatique en cours, d'autre part, elle est un point de passage obligé pour évaluer les impacts. Il s'agit donc d'un indicateur plus tangible que le précédent. C'est d'ailleurs à celui-là que font référence les auteurs du GIEC ([McCarthy et al., 2001], chap. XIX) pour caractériser des seuils de changement climatique dangereux pour différentes catégories d'impacts (voir la Figure 1.1 au chapitre 1).

Nous nous proposons donc de poursuivre les analyses coût-efficacité des politiques climatiques en introduisant non plus des contraintes faisant référence aux concentrations mais des contraintes faisant référence à l'évolution de la température moyenne globale. Une première motivation en est bien sûr de retenir un indicateur plus proche de la réalité des dommages. Une deuxième motivation est de pouvoir introduire une composante majeure dans le raisonnement : le rythme du changement climatique. En effet, les plafonds de concentration sont des contraintes statiques de long-terme tandis qu'en modélisant l'évolution de la température moyenne globale, on peut introduire en plus d'une contrainte statique sur l'amplitude du réchauffement, une contrainte dynamique sur le rythme du réchauffement, dont nous avons vu qu'il s'agissait d'un déterminant essentiel des risques. Enfin, la troisième motivation est la suivante : le passage concentration-température permet d'intégrer de manière explicite les incertitudes sur la réponse du climat à un niveau donné de concentration, incertitudes dont nous examinerons l'impact sur la décision de court-terme. Avant d'entrer plus avant dans cette analyse, passons en revue les quelques contributions publiées dans ce domaine, contributions qui sont peu nombreuses en comparaison des études sur les trajectoires d'émissions dans le contexte de la stabilisation des concentrations.

I. Incertitude sur la sensibilité du climat et politique climatique optimale : historique et état des lieux

Un article récent, [Caldeira et al., 2003], montre combien l'incertitude sur la sensibilité du climat est déterminante pour la décision et étudie comment, pour un seuil de réchauffement de 2 °C, cette incertitude se propage aux profils d'émissions compatibles avec cette contrainte. C'est ce qui est présenté Figure IV-1 où on peut constater que selon la valeur de la sensibilité du climat, les efforts en 2020 représentent un volume très important du scénario de référence si elle prend une valeur élevée (+4,5 °C) ou ne sont absolument pas nécessaires si elle occupe une valeur basse (+1,5 °C) ; en 2050, dans la pire des configurations, les émissions doivent être presque nulles. Pour satisfaire ces sentiers d'émissions, les auteurs montrent que dès 2020, des efforts significatifs de réforme des systèmes énergétiques doivent être entrepris : si la sensibilité

du climat est haute (égale à +4,5 °C), il faut satisfaire jusqu'à 60 % de la demande d'énergie sans émettre et si elle est basse (proche de +2 °C), environ 30%. Dans tous les cas (en particulier, si le seuil de réchauffement admissible est plus élevé, jusqu'à +4 °C), à plus long-terme (vers 2100), c'est presque 75% de la demande qu'il faudra satisfaire sans émettre. De tels résultats mettent en évidence toute l'importance de l'incertitude sur la dynamique du climat mais il s'agit d'analyses de sensibilité : on n'y examine pas à proprement parler les articulation entre décision optimale, incertitude et éventuellement arrivée de nouvelles connaissances.

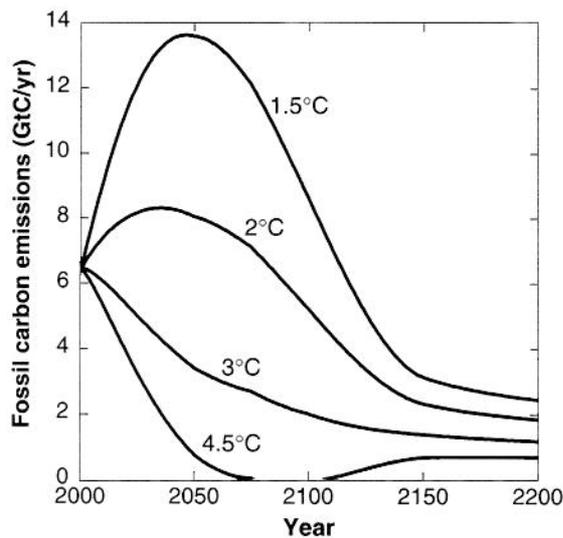


Figure IV-1. Trajectoires d'émissions de CO₂ et incertitude sur la dynamique du climat.

La figure présente les trajectoires d'émissions qui sont compatibles avec un seuil de réchauffement de +2 °C pour différentes valeurs de la sensibilité du climat. Pour atteindre ce seuil, soit on peut laisser les émissions doubler jusqu'au milieu du siècle avant de les réduire (sensibilité basse), soit on doit enclencher dès maintenant des efforts de réduction pour les amener à zéro au dernier tiers du siècle (sensibilité haute). IS92a est le scénario de référence.

Source : [Caldeira et al., 2003], fig 1.

Des études antérieures avaient commencé cette exploration et on peut y distinguer deux courants principaux :

- D'un côté, des études reposant sur des modèles à forte composante socio-économique et technique tandis que le cycle du carbone ou l'évolution du climat sont laissés à des représentations très simplifiées. Ces modèles sont résolus selon un mode coût-efficacité (maximisation inter-temporelle du bien-être ou minimisation de la somme des coûts actualisés sous contrainte environnementale) et leur solution donne la trajectoire d'émissions optimales compte-tenu des contraintes environnementales, des caractéristiques de l'économie, du système énergétique, des dynamiques environnementales et d'appréciations sur l'agrégation des préférences et la pondération des générations successives. Il s'agit donc de modèles de contrôle optimal, profondément ancrés dans les territoires de l'économie et des techniques.
- De l'autre, des études reposant davantage sur des modèles à forte composante environnementale, les caractéristiques des systèmes socio-économiques étant bien souvent définies 'en creux', au moyen de contraintes (par exemple, le rythme maximum admissible de réduction annuelle des émissions). Ces modèles cherchent donc à définir un corridor de viabilité qui contient les états admissibles du système compte tenu de seuils de tolérance. Ils délimitent ainsi l'ensemble des trajectoires d'émissions de GES qui sont compatibles avec un espace de contraintes données mais ne permettent pas de choisir un sentier d'émissions précis. Ce sont les analyses de type *Tolerable Windows Approach* [Petschel-Held et al., 1999; Toth et al., 1997] et *Safe Landing Analysis* [Alcamo et Kreileman, 1996; Swart et al., 1998].

Intéressons-nous d'abord aux résultats des analyses de la première catégorie. [Hammitt et al., 1992] examinent l'influence de deux incertitudes sur le choix de la politique climatique : incertitude sur le seuil de réchauffement admissible (c'est à dire sur l'objectif de la politique) et sur la dynamique du climat. Le processus de décision est séquentiel et comprend une période de court-terme (de 1992 à 2002) pendant laquelle l'incertitude est complète et une seconde période, commençant en 2002, date à laquelle le seuil de réchauffement dangereux comme la dynamique du climat sont connues.

Pendant la première période, deux politiques alternatives sont envisageables : réductions des émissions de GES modérées (du côté de la demande *via* des économies d'énergie) ou réductions beaucoup plus importantes (action sur la demande et modification de l'offre, en particulier par une réforme en profondeur du système énergétique). Au début de la seconde période, le niveau d'effort est ajusté de manière à satisfaire la contrainte climatique compte tenu de la dynamique du climat (en faisant appel à tous les types de mesures).

Leurs résultats montrent que le coût total des efforts d'abattement (actualisé à 5%) est beaucoup moins sensible au choix de la politique de court terme qu'il ne l'est à la valeur des deux paramètres initialement inconnus. Les coûts sont en effet peu différenciés selon le type d'action en première période mais croissent très rapidement plus la contrainte climatique est resserrée et plus la sensibilité du climat est élevée. La raison principale vient du fait que compte tenu du temps caractéristique très long de la réponse du climat, les différences entre les émissions de GES dues au choix des politiques (qui influence le flux de pollution à court-terme) n'induisent que des différences très faibles sur la réponse du climat (liée au stock de pollution à long terme) ; l'efficacité environnementale des politiques n'est donc pas très différente à court-terme et repose pour l'essentiel sur les efforts de seconde période.

Cependant, même si le coût total est peu discriminé selon le choix des mesures entreprises pendant les dix premières années, la politique agressive doit être préférée à la politique modérée si et seulement si la contrainte climatique est inférieure à une valeur liminaire dépendant de la sensibilité du climat : plus la sensibilité du climat est élevée (plus la réponse du climat à un scénario de concentrations est importante), plus ce seuil discriminant est élevé (c'est à dire - à moins de viser un plafond de réchauffement particulièrement élevé - plus il faut commencer les efforts tôt). L'interprétation qui en est donnée fait appel à la même argumentation que [Ha Duong et al., 1997]: le rôle du couple inertie-incertitude. La présence d'inertie socio-économique qui augmente les coûts d'abattement si les efforts doivent être singulièrement renforcés pousse à choisir dès aujourd'hui des politiques qui peuvent sembler coûteuses pour se prémunir contre de mauvaises surprises du côté du climat (sensibilité du climat avérée élevée) ou des dommages (seuil de réchauffement admissible finalement bas).

Deux ans plus tard, les mêmes chercheurs reprennent leur analyse en étudiant cette fois comment l'éventualité d'une surprise climatique pourrait modifier leurs résultats précédemment établis [Lempert et al., 1994]. A ce titre, ils envisagent plusieurs phénomènes : instabilité des puits de carbone, relargage de méthane, remaniement de la circulation thermohaline et découverte que la sensibilité du climat est en fait deux fois plus élevée qu'on ne le croyait. Les résultats de [Hammitt et al., 1992] ne sont pas remis en cause pour autant. Au maximum, est-il établi que pour la sensibilité du climat, une mauvaise surprise peut faire davantage préférer une politique de court-terme agressive que dans [Hammitt et al., 1992].

Trois commentaires peuvent être formulés. En premier lieu, les auteurs ont exploré une large gamme de contraintes climatiques (d'un peu plus de 0,5 °C à presque 6 °C) pour différentes valeurs de la sensibilité du climat (0,5 °C ; 1,5 °C ; 2,5 °C ; 4,5 °C). Cependant, ils n'ont pas pris

en compte l'impact d'une contrainte comme le rythme du réchauffement sur les coûts et les trajectoires d'émissions.

Deuxièmement, leur analyse tient plus d'une analyse de sensibilité assez raffinée que d'un véritable modèle de prise de décision dans l'incertain. En effet, le niveau d'effort en première période est déterminé *indépendamment* des états du monde qui seront révélés en 2002 : par exemple, l'objectif des mesures d'économie d'énergie est de faire chuter de 30% l'intensité énergétique du PIB sur 20 ans et ce quelle que soit la politique qu'il faudra adopter dès 2002. Si cette approche permet de ne pas recourir à des distributions de probabilités (subjectives donc très facilement critiquables) sur le seuil maximal de réchauffement ou la sensibilité du climat, elle n'articule pas complètement la prise de décision et l'incertitude.

Enfin, le délai d'apprentissage est bien court, dix ans seulement, ce qui correspond à des hypothèses très optimistes sur la progression des connaissances. *A posteriori*, il est encore plus facile de le constater quand on mesure toutes les incertitudes qui subsistent encore aujourd'hui sur la dynamique du climat ou les dommages. En particulier, les auteurs n'ont pas examiné comment leurs conclusions évoluaient plus l'information sur le seuil maximal de réchauffement ou la sensibilité du climat arrivait tard, si les deux incertitudes avaient le même impact sur la décision de court-terme, si cette importance relative pouvait être modifiée selon l'échéance des progressions des connaissances.

Tournons nous maintenant vers les résultats des exercices de modélisation inverse (voir Encadré IV-1). Ces approches examinent l'articulation entre les dynamiques de long-terme dans la réponse du climat et des écosystèmes et les actions à plus court-terme, à l'échelle de notre génération. Plus précisément, elles recherchent les profils d'émissions qui sont compatibles avec des objectifs de long-terme, définis sous forme de contraintes (par exemple, hausse du niveau des mers tolérable, amplitude maximale de réchauffement, rythme limite de réchauffement), et étudient comment ces contraintes (de long-terme) influencent le corridor d'émissions (à court-terme) : poids relatifs des contraintes entre elles ou valeurs critiques. La définition du corridor repose également sur des contraintes d'ordre technico-économique (rythme maximum de décarbonisation de l'économie) et d'autres paramètres contextuels, comme la nature du régime d'allocation des efforts entre régions.

Nous nous intéresserons ici aux résultats de [Swart *et al.*, 1998] qui ont suivi une *Safe Landing Approach* pour étudier les implications des objectifs de l'Union Européenne sur les efforts de court-terme. Ces objectifs sont les suivants : *'the global average should not exceed the preindustrial level by more than 2 °C and that therefore carbon dioxide concentration levels lower than 550ppm should guide global emissions reduction efforts'* [European Commission, 1996]. La référence à l'époque pré-industrielle implique en fait une amplitude maximale du réchauffement de 1,5 °C depuis 1990, compte tenu du réchauffement observé à l'échelle globale sur le XX^{ème} siècle.

Encadré IV-1. Tolerable Windows Approach ou Safe Landing Analysis : deux approches inverses en modélisation intégrée du changement climatique.

Les exercices de modélisation inverse de type *Tolerable Windows Approach* (TWA) ou *Safe Landing Analysis* (SLA) sont des approches de modélisation intégrée dont l'objectif est de combler le fossé entre équipes de modélisation et négociateurs ou décideurs. En effet, les modèles intégrés sont souvent perçus, en dehors de la communauté scientifique, comme des boîtes noires et qu'il s'agisse de leur structure, des hypothèses embarquées ou de leurs résultats, il est particulièrement difficile en peu de temps ou en quelques pages d'en présenter les spécificités, les atouts, les limites, d'énoncer un certain nombre de *caveats* au moment de présenter les résultats ou de discuter d'incertitude. La communication entre modélisateurs et utilisateurs avants des modèles autour de « quelques » chiffres n'est donc pas une tâche aisée : complexité des phénomènes impliqués, difficultés spécifiques liées à l'activité de modélisation, très grande masse d'informations souvent obscure ou peu organisée, évaluation de l'incertitude, etc.

Les approches TWA ou SLA essaient d'y remédier dans la mesure où elles produisent un ensemble d'indicateurs, dont les décideurs sont plus familiers, pour évaluer l'efficacité des politiques climatiques selon plusieurs critères : efficacité environnementale, distribution des impacts, répartition des efforts de réduction et de leurs coûts, ... En même temps, comme il s'agit de modèles relativement simples, à résolution rapide et dotés d'une interface conviviale¹, il est possible pour un utilisateur d'évaluer par lui-même facilement les conséquences sur tel ou tel point d'une politique donnée (contraintes sur les émissions de GES et impacts résultants en terme d'amplitude et rythme du réchauffement global et de hausse globale du niveau des mers) et de tester personnellement l'influence de différents facteurs sur les résultats du modèles (par exemple, que se passe-t-il quand on relâche telle contrainte ?). Ainsi, l'approche SLA qui permet d'examiner les liens entre objectifs de long-terme des politiques climatiques (hausse du niveau des mers tolérable, amplitude maximale de réchauffement, rythme limite de réchauffement) et les décisions de court-terme, pour différents scénarios d'émissions ou différents mécanismes de répartition des efforts entre Annexe I et autres pays, ou le logiciel *FAIR* (Framework to Assess International Regimes for burden sharing) [den Elzen et al., 2000; den Elzen et al., 1999], destiné à évaluer différentes règles de différenciation des engagements futurs.

Les exercices de type TWA, développés au PIK (Potsdam, Allemagne) pour le German Advisory Board on Global Change (WBGU), bien que relevant du même principe, sont en fait beaucoup plus complexes : à la différence des approches SLA, qui recouvrent trois espaces décrits à l'échelle globale (les émissions de GES, la chimie de l'atmosphère, le climat global (avec l'océan)), ces exercices embrassent une beaucoup plus grande séquence de la chaîne causale du changement climatique, avec éventuellement quelques considérations régionales (socio-économie, mesures d'abattement, émissions de GES, chimie de l'atmosphère, climat global (avec l'océan), écosystèmes et impacts). Cette plus grande diversité permet d'introduire davantage d'indicateurs d'impacts et de performances des politiques (fardeau en termes de pertes momentanées ou cumulées du PIB régional, de la consommation par tête régionale, etc.) et de définir des garde-fous beaucoup plus détaillés (superficie d'écosystèmes menacés, impact sur la sécurité alimentaire, approvisionnement en eau, etc.). C'est à partir du modèle *ICLIPS* (Integrated assessment of CLimate Protection Strategies) [Leimbach et al., 2000] que sont développés ces exercices. Il s'agit d'un modèle intégré assez complexe, couplant un modèle de croissance régionalisé (type Ramsey, comprenant 11 régions, considérant deux facteurs de production (capital, travail ; le premier étant mobile), des coûts d'abattements dynamiques et un module d'échange de permis, auquel se greffe un modèle Land-use et un modèle d'échanges internationaux, une description régionalisée du climat et des fonctions d'impact régionalisées (disponibilité de la ressource eau, écosystèmes naturels, réserves naturelles, agriculture). Mais ce saut qualitatif en termes de richesse des informations mises à disposition s'accompagne de difficultés numériques pour résoudre un modèle aussi complexe et contrôler ses résultats.

L'horizon du modèle est 2100. Toutes les variables sont globales et les spécifications du modèle sont dérivées du modèle *IMAGE 2.1* [Alcamo et al., 1998]. Plusieurs contraintes sont imposées qui représentent les différentes catégories de risques qu'au maximum les décideurs sont prêts à

¹ Ceci étant vrai surtout des deux 'produits' du RIVM (Bilthoven, Pays Bas), le logiciel *FAIR* et l'approche SLA, utilisés lors des ateliers du projet COOL (Climate OptiOns for the Long term) Global Dialogue (1999-2001), réunissant scientifiques, négociateurs, décideurs, industriels, ONGs autour des questions des objectifs de long-terme des politiques climatiques et de leurs implications à court-terme [Berk et al., 2001a, b; Tuinstra et al., 2002].

encourir. Ces seuils sont les suivants (les chiffres entre parenthèses indiquent, pour chaque catégorie, la valeur dans le cas central et nous rappelons en même temps l'interprétation en termes de type de risque qu'en donnent les auteurs):

- amplitude du réchauffement depuis 1990 (+1,5 °C) - indicateur d'ensemble des impacts ;
- rythme décennal du réchauffement (+0,15 °C/dec - cette contrainte pouvant être dépassée pendant deux décennies) - indicateur plus spécifiquement des risques pour les écosystèmes dont les capacités d'adaptation peuvent être saturées si le rythme de réchauffement et du déploiement de ses impacts est trop élevé ;
- amplitude de la hausse du niveau des mers (30cm) - indicateur pertinent pour les petites îles (groupe AOSIS) et les zones côtières ;
- rythme maximum de décarbonisation de l'économie (2% par an) - risque de choc sur les systèmes technico-économiques.

Leurs résultats permettent d'évaluer l'importance des contraintes sur la forme du corridor ; Ils mettent en évidence que la contrainte de rythme du réchauffement est particulièrement importante pour les émissions de court-terme tandis que la contrainte d'amplitude du réchauffement joue un rôle plus important à long-terme. Le rythme du réchauffement est en effet plus particulièrement sensible au flux des GES vers l'atmosphère tandis que l'amplitude globale du réchauffement à long-terme est davantage sensible au stock de GES dans l'atmosphère. Ainsi, surtout quand on examine des scénarios avec contrôle des émissions où l'essentiel des efforts est repoussé au-delà de 2050, les émissions de GES croissent très fortement entre 2000 et 2050 (et éventuellement s'infléchissent ensuite), le flux de GES vers l'atmosphère est très important et le rythme du réchauffement croît rapidement. Pendant cette période, la contrainte sur le rythme a de grandes chances de « mordre » plus que la contrainte sur l'amplitude du réchauffement (d'autant plus qu'on est souvent encore à un réchauffement faible). Pendant la seconde moitié du siècle et au-delà, les émissions commencent à s'infléchir et le stock de GES dans l'atmosphère est volumineux : le rythme du réchauffement est moindre que précédemment mais son amplitude est beaucoup plus importante.

Mais si un exercice comme la *Safe Landing Approach* permet d'examiner l'impact de contraintes de long-terme sur les choix de court-terme et d'évaluer l'importance des incertitudes relatives à certains paramètres, il reste un exercice exploratoire (proche en cela des analyses de sensibilité) parce qu'il n'indique pas quelle est la trajectoire d'émissions optimale (compte tenu d'un critère, efficacité économique, équitable répartition des efforts, etc.) à tracer dans le corridor admissible. Pire, si, par tous les points du corridor, il passe au moins une trajectoire qui satisfasse le jeu de contraintes, on n'est absolument pas assuré qu'une trajectoire d'émissions tracée au hasard dans le corridor soit admissible².

Les différentes études que nous venons de présenter permettent de commencer à caractériser l'importance pour la décision des incertitudes sur la dynamique du climat ou sur des paramètres comme les contraintes climatiques retenues comme *proxies* des dommages : comment, dès les prochaines décennies, on pourrait être amené à infléchir de manière significative les trajectoires d'émissions dans des configurations défavorables ; comment les

² Par exemple, la trajectoire qui consiste à entreprendre systématiquement le moins d'efforts. C'est en fait l'enveloppe d'une série de trajectoires admissibles qui consistent à repousser à chaque fois dans le temps un peu plus les efforts (on en fait toujours moins pendant les premières décennies mais toujours plus ensuite) ; l'enveloppe supérieure de ces trajectoires comprend donc des éléments des trajectoires qui comportent peu d'efforts au début, au milieu et à la fin : elle est donc beaucoup trop émettrice.

différentes contraintes influencent à court- et à long-terme les niveaux d'efforts, *etc.* Cependant, nous avons insisté sur le fait que dans ces travaux, on ne représente pas le processus de décision dans l'incertain : on n'y examine pas les articulations entre décision optimale, incertitude et arrivée de nouvelles connaissances.

C'est à quoi nous allons nous employer dans ce chapitre, à partir d'un modèle coût-efficacité d'optimisation des politiques de réduction des émissions de CO₂, sous contraintes d'évolution du climat (son amplitude à long-terme et son rythme). Nous le présentons dans une première section, en détaillant plus particulièrement le module d'évolution de la température que nous avons construit pour représenter finement les inerties naturelles en présence à l'échelle du XXI^{ème} siècle. La deuxième section est consacrée à l'analyse de sensibilité du modèle en univers certain. Celle-ci porte sur un ensemble de paramètres socio-économiques et environnementaux susceptibles d'influencer la réponse optimale du modèle: le taux d'actualisation et l'inertie socio-économique, la sensibilité du climat et les deux contraintes climatiques. Dans la troisième section, nous examinons l'impact de l'incertitude relative à la sensibilité du climat sur la décision de court-terme, dans une optique de précaution : Induit-elle des regrets économiques importants ? La perspective de réduire les incertitudes se traduit-elle par une relative flexibilité dans les efforts de court-terme ? Nous complétons cette analyse en étudiant de même l'incertitude sur les deux contraintes climatiques pour être en mesure de comparer finalement dans un cadre coût-efficacité le poids relatif des incertitudes concernant la sensibilité du climat, le niveau et le rythme critiques du changement climatique.

II. RESPONSE_Θ : un modèle d'optimisation inter-temporelle des politiques climatiques sous contraintes d'évolution du climat

RESPONSE_Θ appartient à la famille *RESPONSE*, une famille de modèles intégrés du changement climatique qui relèvent de la catégorie des modèles d'optimisation des politiques climatiques. Il comprend une représentation du coût des politiques climatiques (volume des émissions et coût de réduction des émissions, qui prend en compte un facteur de progrès technique autonome et l'inertie socio-économique qui intervient comme multiplicateur des coûts) et une modélisation de la chaîne causale qui va des émissions au changement climatique : passage émissions - concentration (cycle du carbone) et variation de la concentration atmosphérique de CO₂ - changement climatique (modèle d'évolution de la température). Comme nous nous intéressons à la distribution temporelle des efforts de réduction des émissions, nous utilisons une version agrégée du modèle, avec une description globale de l'économie et du climat. La solution du modèle est obtenue en recherchant le vecteur des efforts de réduction des émissions de CO₂ qui minimise le coût actualisé des politiques climatiques sous contrainte environnementale (ici, sur l'amplitude et le rythme de l'évolution de la température moyenne globale). Ce modèle peut être résolu en univers certain, avec apprentissage (arrivée d'information) ou sous incertitude complète (soit qu'aujourd'hui on soit très pessimiste sur nos facultés de réduire les incertitudes, soit qu'on n'envisage pas cette possibilité). Les sections suivantes sont consacrées à la présentation du modèle en univers certain. Les valeurs des paramètres indiquées correspondent au cas central.

II.1. Module économique : coût de réduction des émissions et émissions de référence

II.1.1. Fonction de coût d'abattement

La spécification fonctionnelle des coûts de réduction des émissions est tirée du modèle *STARTS* (*Sectoral Trajectories with Adaptation and Response Turnover of Stocks*). Une description complète en est donnée dans [Lecocq, 2000]. Les coûts totaux de réduction des émissions du modèle *STARTS* ont la forme suivante :

$$f(Ab_t, Ab_{t-1}, t) = \frac{1}{3} BK \cdot PT_t \cdot \gamma (Ab_t, Ab_{t-1}) \cdot em_t \cdot (Ab_t)^3$$

avec les notations:

$f(Ab_t, Ab_{t-1}, t)$	coût total des mesures d'abattement à la date t (trillion <i>US\$</i>)
BK	coût marginal initial de la <i>backstop technology</i> (thousand <i>US\$.tC'</i>)
PT_t	facteur de progrès technique autonome
$\gamma(Ab_t, Ab_{t-1})$	facteur d'inertie socio-économique
em_t	émissions de CO ₂ de référence à la date t (<i>GtC</i>)
Ab_t	taux d'abattement à la date t (% des émissions de référence).

Ces coûts totaux de réduction correspondent à des coûts marginaux de réduction des émissions convexes (quadratiques) en fonction du pourcentage de réduction des émissions, Ab_t , que l'on peut calibrer sur divers dires d'experts et les résultats des principaux modèles technico-économiques. On peut remarquer que les spécifications retenues n'introduisent aucun potentiel sans regret. Compte tenu de la formulation retenue, où l'effort est mesuré en pourcentage des émissions de référence et où les coûts *totaux* sont directement proportionnels au volume d'émissions de référence, on peut constater que le coût *marginal* de réduction des émissions dans une proportion donnée est constant (en particulier, indépendant du volume des émissions de référence). Autrement dit, le coût *marginal* d'un effort d'abattement de 10%, par exemple, est identique quelles que soient les émissions de référence. Cela signifie que d'un scénario d'émissions à l'autre, la distribution des opportunités d'abattement selon le niveau des coûts est à peu près similaire (c'est à dire que la structure de l'économie et l'origine des émissions sont à peu près comparables, ce qui se traduit par une courbe de coût *marginal* en fonction de l'effort relatif identique quelles que soient les émissions de référence) mais que le nombre de chacune de ces opportunités varie selon le volume d'émissions, ce qui se traduit par des coûts *totaux* directement proportionnels aux émissions de référence³.

Le terme BK représente le coût marginal à la date initiale de la *backstop technology*, c'est à dire la technologie permettant de réduire de 100% les émissions fossiles de CO₂ si elle était complètement substituée aux systèmes énergétiques en place. La valeur qui lui est assignée dépend d'hypothèses sur la nature de cette technologie (nucléaire, éolien, photovoltaïque,...), sa date d'apparition et le rythme d'évolution du progrès technique. Compte tenu des hypothèses

³ Par exemple, pour réduire les émissions de 1%, imaginons qu'il faille simplement améliorer l'efficacité énergétique de l'éclairage en passant à des ampoules basse consommation ; le coût marginal de cette action est donc identique quel que soit le volume des émissions de référence si on suppose que la distribution des opportunités d'abattement selon le niveau des coûts est à peu près similaire. En revanche, le coût global de cette action dépend du nombre d'ampoules à changer et il lui est directement proportionnel.

sur le progrès technique (voir ci-après), nous retenons la valeur 1100 \$/tC^t aujourd'hui, ce qui correspond à un coût marginal à l'infini de la *backstop technology* de 275 \$/tC^t.

PT_t capture l'effet du progrès technique autonome sous forme d'un indice de réduction des coûts de réduction des émissions. Il dépend uniquement du temps et pas, comme un facteur de progrès technique induit, de la succession des efforts déjà entrepris. Il traduit la décroissance dans le temps des coûts d'abattement du fait de la décroissance graduelle du coût marginal de la *backstop technology*⁴. On suppose que du fait du progrès technique autonome l'ensemble des coûts de réduction des émissions diminue à un rythme constant de 1% par an. Néanmoins, on fait l'hypothèse que les coûts ne peuvent pas diminuer au delà d'une limite incompressible de 25% de leur valeur initiale. Le facteur PT_t prend donc la forme suivante :

$$PT_t = 0.25 + 0.75e^{-0.018t}$$

avec: δ le pas de temps du modèle (10 ans).

Le terme $\gamma(Ab_t, Ab_{t-1})$ représente l'impact de l'inertie socio-économique sur les coûts de réduction des émissions. L'introduction de ce facteur permet de rendre compte des coûts associés à un remplacement anticipé de certaines unités de capital productif pour mettre en place des technologies plus vertueuses, coûts de transition entre deux systèmes de production qui viennent s'ajouter aux coûts d'exploitation (permanents) des nouvelles technologies exploitées. L'inertie est introduite à l'aide d'un facteur multiplicatif des coûts de réduction des émissions, $\gamma(Ab_t, Ab_{t-1})$. Ce terme prend la valeur 1 (pas de coûts additionnels) lorsque l'augmentation du pourcentage d'abattement entre deux périodes consécutives est inférieure à une valeur limite, notée τ , et croît linéairement avec le taux de croissance inter-périodique du pourcentage d'abattement sinon. τ représente le taux de renouvellement du capital émetteur en deçà duquel on n'assiste pas son remplacement prématuré⁵. Dans le cas central, nous estimons que l'inertie des systèmes socio-économiques liée aux modes de production et de consommation d'énergie est de l'ordre d'une vingtaine d'années ; τ prend donc la valeur 0,05 ai^t .

$$\gamma(Ab_t, Ab_{t-1}) = \begin{cases} 1 & \text{si } \frac{Ab_t - Ab_{t-1}}{\delta\tau} \leq 1 \\ \frac{Ab_t - Ab_{t-1}}{\delta\tau} & \text{sinon} \end{cases}$$

⁴ Il convient de le distinguer de l'effet du progrès technique plus général sur le profil énergétique de l'économie, dans le sens d'une baisse des émissions par unité de produit, imputable à l'amélioration de l'intensité énergétique et à une décarbonisation naturelle de l'offre énergétique, cet effet étant déjà présent dans le scénario de référence.

⁵ C'est là une vision de l'inertie socio-économique et de son impact sur les coûts uniquement centrée sur le capital émetteur installé et les coûts supportés si on le remplace avant son obsolescence naturelle. Nous avons vu au chapitre précédent qu'il existait d'autres formes d'inertie socio-économique, notamment sur les comportements de consommation et les modes de vie. Dans ce cas, le facteur d'inertie pourrait s'interpréter comme le coût des politiques à mettre en œuvre pour inciter les populations à changer rapidement leurs habitudes de consommation. On doit également rajouter les coûts sociaux induits par des chocs sur des systèmes socio-économiques organisés autour d'industries fortement émettrices (transport routier en France) ou productrices (le secteur des charbonnages en Inde ou en Chine). C'est l'ensemble de ces coûts sociaux que représente en fait le facteur inertie que nous employons et sa formulation en terme de temps caractéristique traduit de manière schématique le rythme d'accroissement des efforts de réduction au-delà duquel les politiques climatiques deviennent agressives pour les systèmes socio-économiques. C'est d'ailleurs l'une des contraintes socio-économiques dans les exercices de modélisation inverse (voir ci-avant).

A titre de comparaison, on donne au Tableau IV-1 les coûts d'abattement (non actualisés) et le prix du carbone d'un respect des engagements de Kyoto en 2010 calculés à partir de la fonction de coût que nous venons de présenter, pour les quatre marqueurs des scénarios SRES. Les différences proviennent toutes des incertitudes sur les scénarios de référence. Les coûts marginaux que nous obtenons se situent dans le bas de la très large fourchette des coûts publiés par l'EMF [Weyant, 1999]: entre 5 et 123 US\$/tC (moyenne : 34,5 US\$/tC, variance : 31,2 US\$/tC) pour un respect des engagements de Kyoto avec commerce mondial en 2010. Il s'agit d'estimations anciennes et une révision récente, intégrant les nouvelles tendances à la baisse pour les émissions de l'UE et à la hausse pour le volume du *hot air* russe (voir [Hourcade et Gherzi, 2002] pour les évaluations numériques) laisse entendre qu'elles ont tendance finalement à sur-estimer les coûts d'un respect du Protocole de Kyoto (baisse de la demande et hausse de l'offre).

Scénario	Niveau d'abat- tement agrégé (% des émissions de référence)	Coût total agrégé (milliard US\$)	Coût total agrégé (% PIB mondial)	Coût marginal (\$/tC)
A1	9,62	9,20	0,024	8,79
A2	9,02	6,69	0,021	7,74
B1	5,25	1,27	0,003	2,62
B2	6,37	2,16	0,006	3,86

Tableau IV-1. Coûts totaux et coûts marginaux du respect des engagements de Kyoto, pour les quatre marqueurs SRES (coûts non actualisés, en 2010).

Concluons par une remarque sur ce que signifie cette fonction de coût agrégé et sur les limites d'une modélisation des coûts sociaux des politiques climatiques selon une telle approche. Nature des coûts, en premier lieu. Les coûts représentés par cette fonction sont les coûts macroéconomiques, agrégés entre les régions, qui résultent de l'imposition d'une contrainte sur les émissions de CO₂. Ils recouvrent ainsi les différents types de coûts quand on cherche à infléchir les émissions : des coûts techniques, liés aux mesures concrètes pour réduire les émissions, des coûts sectoriels ensuite, associés à l'impact des mesures techniques sur la fonction de production d'un secteur dans son ensemble (changement des prix relatifs des énergies à la suite de l'introduction d'une taxe carbone pour la sidérurgie et ses répercussions sur la compétitivité internationale de ce secteur), des coûts macro-économiques enfin à l'échelle d'un pays (relations entre les différents coûts sectoriels, coûts sociaux de relocalisation d'activités, impacts du marché de carbone ou d'une perte de compétitivité sur la balance commerciale). Il s'agit donc d'une notion non-triviale puisque s'y recouper au moins trois types de coûts, qui sont évalués avec des modèles différents (modèles sectoriels et technico-économiques/modèles macro-économiques nationaux ou mondiaux) et qui sont interprétés de manière différentes. L'incertitude dans ce domaine est donc importante (quand on navigue d'une évaluation selon une approche *bottom-up* à une approche *top-down*) de même que la polysémie (7 US\$/tC ne signifie absolument pas la même chose si c'est un ingénieur, un entrepreneur, un trader ou un décideur qui parle).

Le second volet de cette remarque porte sur les limites d'une modélisation des coûts sociaux des politiques climatiques qui ne représente pas explicitement les dynamiques du secteur énergétique, leurs liens avec le scénario de croissance et les implications des politiques de réduction des émissions. Dans l'approche que nous suivons en effet, la trajectoire d'émissions

futures n'est pas affectée par les efforts d'abattement⁶ : si nous réduisons les émissions de 10% pendant 10 ans, puis de 20% pendant la décennie suivante, par exemple, et qu'ensuite nous interrompons les efforts, les émissions du modèle reviennent instantanément à la trajectoire de référence. Si en revanche, on représente de manière explicite la dynamique du capital émetteur, alors les décisions de contrôler les émissions influencent directement sa structure et même si les politiques climatiques sont abandonnées ou relâchées, les émissions ne retournent pas à une hypothétique trajectoire de référence (celle que l'on aurait en l'absence de politiques climatiques) mais suivent une trajectoire désormais moins émettrice.

Une première justification à notre approche est d'ordre technique. Il s'agit d'une solution simple à mettre en œuvre pour tester facilement une grande batterie de résultats sur les coûts de réduction des émissions produits par des modèles technico-économiques ou macro-économiques et évaluer leurs implications sur la décision optimale en matière de politique climatique. On calibre un modèle de croissance avec émissions de GES de manière à retrouver les scénarios SRES et on introduit les coûts des politiques climatiques (calibrés à partir des estimations qui circulent dans la littérature) comme des coûts perdus nécessaires pour respecter des contraintes environnementales le long du sentier de croissance. Pour conserver cette approche mais remédier à l'inconvénient dont nous avons parlé, [Hammit, 1999] introduit un facteur de rémanence qui infléchit naturellement les émissions de référence en fonction des efforts d'abattement passés ; malheureusement, ce facteur - qui serait une solution élégante - est très incertain et ne peut être calibré de manière fiable sur aucune donnée.

Une seconde justification, d'ordre théorique, permet de s'en tenir dans un premier temps à notre approche. Si pendant les premières décennies, qui sont la période qui nous intéresse plus particulièrement, les efforts d'abattement restent modestes (et c'est, dans l'ensemble, ce que l'on observe), on peut estimer que ce sont des opportunités flexibles et à bas coût qui ont été exploitées (actions sur l'éclairage, les petits équipements domestiques, *etc.*) : elles se renouvellent à chaque période et si aucun effort spécifique n'est entrepris en début de période, on retourne à un profil de consommation et d'émissions semblable à celui du scénario de référence. En revanche, si les politiques climatiques sont plus agressives, on peut penser qu'elles induisent un signal politique et économique fort qui s'accompagne d'une réforme en profondeur des systèmes énergétiques à plus long-terme, réforme dans le sens d'une inflexion des émissions (actions sur les infrastructures et les équipements industriels, l'aménagement du territoire et la planification des tissus urbains). Autrement dit, l'approche que nous avons suivie est valable à court-terme dans la mesure où les efforts d'abattements restent modestes et ne remettent pas en cause les perspectives de croissance et les dynamiques énergétiques⁷.

⁶ On veut bien dire ici que les décisions en matière de politiques climatiques n'affectent pas le profil futur des systèmes énergétiques : les émissions de référence restent ... une référence. Dans certains modèles intégrés bouclés sur un modèle de croissance optimale (comme *STARTS* ou *DICE*), les émissions futures sont endogènes au modèle. Elles dépendent du niveau d'activité (et d'un trend de diminution progressive de l'intensité carbone du PIB). Elles sont affectées indirectement par les coûts des mesures d'abattement via une baisse de consommation et d'investissement, donc de niveau d'activité présente et future, mais, là encore, la structure énergétique de l'économie (l'intensité carbone du PIB) n'est pas modifiée par les décisions d'abattement.

⁷ On peut trouver dans [Lecocq et Crassous, 2003] (p. 15 et *sq.*) une discussion plus détaillée sur un point très lié à cette question : l'écriture de courbes de coûts marginaux d'abattement dans une perspective dynamique.

II.1.2. Scénario de croissance de référence : population mondiale, PIB global et émissions de référence

La discussion précédente a fait ressortir l'importance d'une modélisation explicite du processus de croissance socio-économique, incluant une représentation du changement technique et des dynamiques énergétiques. Ce qui n'est pas sans poser un certain nombre de difficultés dans l'écriture et la manipulation d'un tel modèle : d'ordre théorique (quel paradigme retenir pour modéliser le progrès technique), d'ordre pratique (comment calibrer raisonnablement, tout en restant à un niveau très agrégé, les formes fonctionnelles retenues), d'ordre numérique (comment contrôler et analyser les résultats d'un modèle finalement très complexe, incluant de nombreuses variables et des paramétrisations incertaines). Pour des raisons de clarté donc, nous nous en tiendrons à une approche d'équilibre partiel, le long d'un scénario de croissance, pour étudier les politiques climatiques en présence d'incertitude sur la dynamique du climat et les menaces du changement climatique.

Pour harmoniser les différents exercices numériques conduits à l'aide du modèle *RESPONSE*, toutes les simulations utilisent le même jeu de données socio-économiques. Nous avons utilisé les projections d'un scénario SRES, le marqueur de la famille A1, pour les données démographiques (population mondiale), économiques (PIB global) et techniques (volume d'émissions de référence de CO₂, en considérant à la fois les émissions liées à l'utilisation de combustibles fossiles et au changement d'usage des sols).

Le scénario marqueur de la famille A1 a été développé par le National Institute of Environmental Studies (NIES) (Japon) à partir du modèle *AIM* (Asian Pacific Integrated Model) : *"The A1 storyline and scenario family describes a future world of very rapid economic growth, global population that peaks in mid-century and declines thereafter, and the rapid introduction of new and more efficient technologies. Major underlying themes are convergence among regions, capacity building and increased cultural and social interactions, with a substantial reduction in regional differences in per capita income"* [Nakicenovic, 2000]. Le marqueur de la famille A1 est ainsi un scénario correspondant à des croyances très optimistes sur le futur : c'est le tableau d'un avenir prospère et généreux où la croissance économique est soutenue. Surtout il s'y opère un rattrapage très rapide des pays en développement, avec un changement structurel continu accompagné d'une diffusion rapide des innovations techniques, deux phénomènes qui conduisent à une décroissance des émissions de GES dès 2050.

Les hypothèses présentes dans ce scénario pourraient donc typiquement servir à justifier le report des efforts puisque les discours en ce sens font appel le plus fréquemment

- à l'argument du progrès technique : « Il vaut mieux investir dans les activités R&D du domaine énergétique plutôt que réduire tout de suite les émissions alors que les solutions techniques sont coûteuses et que le changement climatique pourrait s'avérer une menace bénigne »
- ou à l'argument du développement⁸ : « Les pays en développement seront les principales victimes du changement climatique et il est quasiment programmé pour les cinquante prochaines années à venir compte tenu des émissions passées. Plutôt que réduire tout de suite, à tout prix, les émissions des pays industrialisés et modifier à la marge les concentrations atmosphériques des GES, il vaut mieux aider les pays les moins avancés à se développer pour mettre en place des stratégies d'adaptation robustes et préparer leur développement énergétique pour écrier leur pics d'émissions dans les décennies à

⁸ Argument par exemple développé par [Schelling, 1992] (p. 6) ou [Lomborg, 2001].

venir. Même si le changement climatique s'avère une menace bénigne, c'est une option sans regret puisqu'elle favorise des sentiers de développement durable ».

C'est pour examiner comment une telle position attentiste doit ou ne doit pas être révisée quand on suit une approche de précaution fondée sur les mêmes données que nous avons retenu ce scénario.

II.2. Modèle du cycle du carbone : un modèle linéaire à trois réservoirs

Le modèle du cycle du carbone est tiré des modèles *DICE* et *RICE* (pour une description complète : [Nordhaus et Boyer, 2000], Chap. II & III). Ce modèle suit l'évolution des contenus en carbone de trois réservoirs : un compartiment supérieur représentant l'atmosphère, un compartiment intermédiaire regroupant la biosphère continentale et océanique et un océan de surface (jusqu'à 100 m de profondeur) et un compartiment inférieur représentant un océan profond. Chaque réservoir est supposé homogène (rapide équilibrage à court-terme) ; il est caractérisé par le temps de séjour du carbone en son sein et la rapidité des échanges avec les autres réservoirs.

Les émissions de GES (CO₂ seulement) s'accumulent dans l'atmosphère et diffusent lentement vers la biosphère et le puit océanique. Les flux de carbone entre ces réservoirs dépendent de coefficients de transfert constants. Il s'agit donc d'un modèle linéaire que l'on peut représenter avec la notation matricielle suivante.

Soit le vecteur C_t des contenus carbone de chacun des réservoirs envisagés,

$$C_t = \begin{pmatrix} A_t \\ B_t \\ O_t \end{pmatrix}$$

où: A_t contenu carbone de l'atmosphère à la date t (GtC)
 B_t contenu carbone de la biosphère continentale et océanique et de l'océan de surface à la date t (GtC)
 O_t contenu carbone de l'océan profond à la date t (GtC).

L'évolution de C_t au cours du temps est donnée par :

$$C_{t+1} = C_{trans} \cdot C_t + \delta \cdot (1 - Ab_t) \cdot em_t \cdot u$$

où C_{trans} matrice des coefficients de transfert entre chaque réservoir
 u un vecteur colonne, [1 ; 0 ; 0].

Le calibrage de Nordhaus aboutit aux valeurs suivantes, qui correspondent à un modèle par pas de temps décennal :

$$C_{trans} = \begin{pmatrix} 0.66616 & 0.27607 & 0 \\ 0.33384 & 0.60897 & 0.00422 \\ 0 & 0.11496 & 0.99578 \end{pmatrix}^9, \text{ conditions initiales (GtC) } C_{1990} = \begin{pmatrix} 758 \\ 793 \\ 19230 \end{pmatrix}.$$

Par construction, le modèle a une inertie de 10 ans en raison du décalage automatique entre les émissions de CO₂ et leur accumulation dans l'atmosphère. L'inertie du modèle est en fait beaucoup plus importante et correspond à une demi-vie du carbone atmosphérique de l'ordre de 50 ans : après 200 ans, il reste toujours près de 20% d'une quantité de carbone initialement émise dans l'atmosphère.

A côté de l'inertie des phénomènes naturels, le modèle rend également compte de l'accumulation irréversible des GES dans l'atmosphère : les tonnes de carbone fossile émises par l'homme se répartissent entre les réservoirs atmosphériques, océaniques et biosphériques et une partie des émissions cumulées séjourne toujours dans l'atmosphère ; même longtemps après l'interruption des émissions, on ne revient donc pas aux niveaux pré-industriels.

Intéressons-nous au moment où les émissions de GES sont enfin définitivement nulles, soit T cette date. Le contenu total en carbone des trois réservoirs, C_t , est la somme du contenu de ces réservoirs à la date initiale, C_{1990} , et des émissions cumulées de CO₂, E_{cumul} ; sa répartition entre les trois réservoirs dépend de la chronologie des émissions. Une fois que les émissions sont interrompues, la dynamique du cycle du carbone est donnée par une suite récurrente linéaire et homogène du premier ordre à coefficients constants :

$$C_{t+1} = C_{trans} \cdot C_t \quad \text{condition initiale : } C_t$$

Pour déterminer les états d'équilibre d'une telle suite, il nous faut connaître les propriétés spectrales de C_{trans} . Recherchons d'abord ses valeurs propres. On sait que 1 est valeur propre car c'est la somme de chaque colonne de la matrice. Supposons qu'il existe deux autres valeurs propres, notées λ_1 et λ_2 . On a le système suivant :

$$\begin{cases} 1 + \lambda_1 + \lambda_2 & = Tr(C_{trans}) = 2,27091 \\ 1 \cdot \lambda_1 \cdot \lambda_2 & = Det(C_{trans}) = 0,31186207 \end{cases}$$

Il vient :

$$\begin{cases} \lambda_1^2 - \lambda_1(Tr(C_{trans}) - 1) + Det(C_{trans}) & = 0 \\ \lambda_1 \cdot \lambda_2 & = Det(C_{trans}) \end{cases}$$

Le discriminant de l'équation du second degré, Δ , est

$$\Delta = (Tr(C_{trans}) - 1)^2 - 4 \cdot Det(C_{trans}).$$

Il est strictement positif car

$$\frac{(Tr(C_{trans}) - 1)^2}{4} = \frac{(1,27091)^2}{4} \geq \frac{(1,2)^2}{4} = 0,36 \geq 0,31186207 = Det(C_{trans}).$$

λ_1 et λ_2 sont donc deux valeurs propres réelles distinctes. C_{trans} a trois valeurs propres réelles distinctes, elle est donc diagonalisable.

⁹ On peut remarquer que la somme sur les colonnes de cette matrice, qui représentent vers quel réservoir et dans quelle proportion se dirige le contenu d'un réservoir donné à la période suivante, donne 1 pour assurer la conservation de la quantité de carbone et qu'il n'y a par hypothèse pas d'échange entre l'océan profond et l'atmosphère.

Par ailleurs, on vérifie facilement que C_{trans} est une matrice non négative indécomposable (coefficients non négatifs et graphe connexe). On peut donc appliquer le théorème de Perron-Frobenius. Il existe donc une valeur propre unique, strictement positive et de plus grand module ; sa valeur est comprise entre le minimum et le maximum de la somme des lignes et le minimum et le maximum de la somme des colonnes ; son espace propre est de dimension 1 et un vecteur de base est à coordonnées strictement positives. 1 est donc cette valeur propre et le théorème de Perron-Frobenius nous assure que λ_1 et λ_2 sont de module strictement inférieur à 1.

Sachant que les valeurs propres sont en module toutes strictement inférieures à 1, sauf une qui vaut 1, on est assuré que la suite admet toujours un équilibre mais cet équilibre n'est pas unique (car 1 est valeur propre) et dépend des conditions initiales. L'état d'équilibre est à rechercher dans l'espace propre associé à la valeur propre 1, dont on connaît un vecteur de base, C_{pr} , l'état du système à la période pré-industrielle (qui est par définition un équilibre). En raison de la conservation de la masse, le contenu carbone à l'équilibre, C_∞ , est égal au contenu carbone de C_T ; sa répartition se fait de manière proportionnelle à la répartition observée à l'état d'équilibre de la période pré-industrielle. Autrement dit, *l'état d'équilibre ne dépend que du volume émissions cumulées et il s'établit systématiquement à un niveau plus élevé que l'état d'équilibre préindustriel* (car en raison de l'injection de carbone dans le système et en raison de la conservation de la masse, on a $\sum C_T > \sum C_{pr}$) :

$$C_\infty = \frac{\sum C_T}{\sum C_{pr}} C_{pr} \quad \text{avec} \quad C_{pr} = \begin{pmatrix} 783 \\ 705 \\ 19\,200 \end{pmatrix} \text{ en GtC}$$

La critique majeure adressée à ce modèle est la suivante : les coefficients de C_{trans} sont constants. En particulier, ils sont indépendants du volume des réservoirs (par exemple, la déforestation qui réduit l'activité du puit biosphérique, la saturation du puit biosphérique car la croissance des végétaux ne se poursuit de manière infinie en fixant toujours plus de CO₂ ou l'effet de saturation du puit océanique) et des rétroactions du climat sur le cycle du carbone.

Mais introduire de telles spécifications dans le cycle du carbone aboutirait à complexifier la résolution numérique du modèle sans pour autant se traduire par un saut qualitatif important car les paramétrisations nécessaires sont encore incertaines. Bien plus, des résultats récents indiquent qu'en toute logique l'incertitude sur la dynamique du cycle du carbone (en particulier la rétroaction climat carbone) est cruciale pour évaluer les politiques de stabilisation des concentrations (voir [Houghton et al., 2001], chap. III) mais que pour étudier des politiques de contrôle de l'amplitude du changement climatique, l'incertitude sur la dynamique du climat est plus importante que l'incertitude sur dynamique du cycle du carbone [Caldeira et al., 2003].

II.3. Modèle d'évolution de la température

Le module climatique de *RESPONSE* s'inspire du modèle simplifié à deux compartiments développé par [Schneider et Thompson, 1981] pour étudier la réponse transitoire du climat à l'échelle globale à l'injection de GES dans l'atmosphère. L'évolution de la température est représentée au moyen d'un jeu d'équations qui décrivent la *variation* de la température depuis un état de référence (période pré-industrielle) en réponse au *forçage* anthropique *additionnel* induit depuis lors, c'est donc un modèle de perturbation. Il s'agit d'un modèle simplifié qui ne

prend pas en compte la variabilité naturelle du forçage (aérosols d'origine volcanique, variation de l'activité solaire, par exemple) et n'intègre pas l'influence directe de l'homme sur certaines composantes du bilan radiatif de la Terre, comme les variations de l'albedo de surfaces continentales en lien avec un changement d'affectation des sols. De même, le modèle reproduit l'évolution de variables climatiques moyennes globales mais pas leur distribution géographique ni leur variabilité interne. Par ailleurs, on n'envisage pas d'éventuelles non-linéarités dans la réponse du climat, événements dont les résultats de la paléoclimatologie nous fournissent de plus en plus d'exemples. Le seul GES modélisé est le CO₂.

En réponse à une perturbation du bilan radiatif de l'atmosphère, provoquée par un forçage additionnel lié à l'accumulation de GES d'origine anthropique dans ce réservoir, le système climatique évolue sous l'effet de trois mécanismes auxquels sont associés des échelles de temps contrastées. Avec une temporalité rapide, on assiste à une élévation quasi-immédiate de la température moyenne de l'atmosphère en réponse au forçage additionnel induit par l'accumulation de CO₂. L'effet de ce forçage est atténué ou amplifié par des mécanismes de rétroaction atmosphériques. Avec une temporalité plus longue (de l'ordre de la décennie), on assiste à un échange de flux de chaleur entre l'atmosphère et l'océan de surface qui se traduit par un rééquilibrage progressif des températures moyennes des deux compartiments. C'est dans ce processus qu'une inertie importante est à l'œuvre. Par ailleurs, le fait que la capacité thermique de l'océan de surface soit très largement supérieure à celle de l'atmosphère se caractérise par une rétroaction négative qui modère le réchauffement de l'atmosphère. C'est la superposition de ces trois effets qui permet de retracer l'évolution du système climatique.

Deux compartiments sont ainsi modélisés :

- l'atmosphère et les surfaces continentales, caractérisées par la température moyenne annuelle, dont on suit la variation depuis la période pré-industrielle,
- et l'océan de surface, caractérisé de même par sa température moyenne annuelle, dont on suit de même la variation depuis la période pré-industrielle.

Nordhaus, dans le modèle DICE et le modèle RICE, a adopté une approche similaire. Cependant, des compartiments différents sont considérés: un compartiment qui regroupe l'atmosphère et l'océan de surface et un compartiment qui désigne un océan profond. Son modèle de variation de température est donc caractérisé par une inertie temporelle plus importante (le rééquilibrage entre les deux compartiments s'effectuant sur des échelles de temps beaucoup plus longues, centenaires voire millénaires) et par une "force de rappel" (liée à la différence entre les capacités calorifiques des deux compartiments) également plus importante. Un tel choix de modélisation est justifié pour des projections de très long terme (au delà du siècle) où le processus de rééquilibrage entre atmosphère et océan de surface peut être considéré comme rapide en comparaison du rééquilibrage avec l'océan profond. Mais pour mieux étudier le court- moyen-terme, il est plus approprié de représenter finement les interactions entre atmosphère et océan de surface, en distinguant les deux compartiments, et il est possible de négliger la participation de l'océan profond.

II.3.1. Forçage radiatif

Le forçage radiatif additionnel à la date t induit par une perturbation (ici, anthropique) de la concentration atmosphérique de CO₂ par rapport à sa concentration à la période pré-industrielle est donné par l'expression suivante :

$$F(t) = F_{2x} \frac{\log\left(\frac{M_t}{M_{PI}}\right)}{\log 2}$$

avec: $F(t)$ forçage radiatif instantané à la date t (W.m⁻²)
 M_t concentration atmosphérique de CO₂ à la date t (ppm)
 F_{2x} forçage radiatif instantané associé au doublement
de la concentration atmosphérique pré-industrielle de CO₂ (3,71 W.m⁻²)
 M_{PI} concentration atmosphérique de CO₂ à la période
pré-industrielle (280 ppm)

Cette formule fait partie des expressions les plus simples qui permettent de rendre compte du forçage radiatif associé au CO₂, GES dont la répartition est bien homogène dans l'atmosphère ; elle est rappelée¹⁰ dans le volume du dernier rapport du GIEC traitant de la science du climat ([Houghton et al., 2001], chap. VI, table 6.2, p. 358).

La contribution des autres GES aurait pu être prise en compte par l'introduction d'un terme exogène, donnant à chaque date le forçage induit par tous les autres GES, forçage qui a été calculé pour les scénarios SRES (qui nous servent de référence pour les émissions de CO₂). Cependant, on peut constater que devant les autres GES, le CO₂ joue un rôle dominant : "In 2050 and 2100 the SRES scenarios indicate a stronger dominance of CO₂ on the total greenhouse gas forcing (including tropospheric O₃), at about 70 to 80% of the total forcing" ([Houghton et al., 2001], chap. VI, § 6.15.2.1, p. 402). Par ailleurs, certains GES - comme les aérosols - ne sont pas répartis de manière homogène dans l'atmosphère. La perturbation du bilan radiatif de l'atmosphère qu'ils induisent présente donc une forte signature régionale et il est périlleux de vouloir en rendre compte d'une manière globale en pratiquant une agrégation spatiale. Dès lors, leur prise en compte dans un modèle climatique ne prend sens que dans une perspective régionalisée, ce qui n'est pas le cas ici. Enfin, la contribution au forçage radiatif des autres GES présente encore de très nombreuses incertitudes (signature régionale, durée de vie dans l'atmosphère et interactions avec les autres espèces chimiques, liens avec certains processus de rétroaction climatique) et l'introduction d'un terme exogène sensé reproduire l'influence des autres GES en aurait été inévitablement tributaire sans pour autant apporter une information pertinente pour notre propos¹¹.

Les valeurs de M_{PI} et F_{2x} sont tirées des *best-guess estimates* proposés dans le troisième rapport du GIEC. Pour la concentration atmosphérique de CO₂ à l'époque pré-industrielle, on retient la valeur suivante : 280 ppm (Source : [Houghton et al., 2001], chap. III). L'incertitude sur le

¹⁰ La formule en question est une expression proposée dès le premier rapport du GIEC. Son paramétrage a été actualisé, en particulier si l'on veut rendre compte d'un forçage global uniquement attribué au dioxyde de carbone.

¹¹ Sur ces deux derniers points, voir par exemple la figure 6.6 et le paragraphe 6.13 de [Houghton et al., 2001] (pp. 391-396).

paramètre F_{2x} est relativement faible : en effet, sa valeur dépend de phénomènes physico-chimiques bien connus et les valeurs données par exemple dans le troisième rapport du GIEC s'étalent de 3,45 W.m⁻² à 3,8 W.m⁻² avec une valeur centrale de 3,71 W.m⁻², que nous avons retenue¹².

II.3.2. Evolution de la température

L'évolution annuelle de la température en réponse à l'effet de serre additionnel anthropique est donnée par l'équation matricielle suivante :

$$\begin{bmatrix} \theta_{At}(t+1) \\ \theta_{Oc}(t+1) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 - \sigma_1(\lambda + \sigma_2) & \sigma_1\sigma_2 \\ \sigma_3 & 1 - \sigma_3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \theta_{At}(t) \\ \theta_{Oc}(t) \end{bmatrix} + \sigma_1 \begin{bmatrix} F(t) \\ 0 \end{bmatrix}$$

avec:

- $\theta_{At}(t)$ variation de la température atmosphérique moyenne globale annuelle depuis la période pré-industrielle, à l'année t (°C)
- $\theta_{Oc}(t)$ variation de la température moyenne globale annuelle de l'océan depuis la période pré-industrielle, à l'année t (°C)
- λ facteur de rétrocontrôle climatique (C⁻¹.W.m⁻²)
- σ_1 coefficient (C.W⁻¹.m²)
- σ_2 coefficient de transfert (C⁻¹.W.m⁻²)
- σ_3 coefficient (sans dimension)

Ce jeu d'équations représente de manière très simplifiée la dynamique du climat décrite précédemment.

La variation de la température moyenne annuelle globale de l'atmosphère et des superficies continentales dépend du forçage radiatif additionnel induit par une modification de la concentration atmosphérique de CO₂ par rapport à son niveau pré-industriel, $\sigma_1 F(t)$, forçage dont l'effet est atténué par les mécanismes de rétroaction atmosphérique du climat, $-\sigma_1 \lambda \theta_{At}(t)$, et par un rééquilibrage avec l'océan de surface, $-\sigma_1 \sigma_2 (\theta_{At}(t) - \theta_{Oc}(t))$.

Réciproquement, la variation de la température moyenne annuelle de l'océan de surface dépend de ce rééquilibrage, $\sigma_3 (\theta_{At}(t) - \theta_{Oc}(t))$.

¹² Il s'agit ici du forçage radiatif du CO₂ (au doublement de la concentration pré-industrielle), considéré comme seul GES - comme c'est le cas dans les expériences de calcul de sensibilité du climat. Ce chiffre est donc plus faible que la valeur du forçage radiatif du CO₂ utilisé dans les calculs du forçage radiatif imputable à tous les GES puisque certains de ces forçages sont négatifs. Les valeurs citées ici correspondent aux valeurs obtenues pour les calibrages du modèle MAGICC à partir de GCM (cf. [Houghton et al., 2001], chap. IX, Appendix 9.1 (p. 577)).

Pour interpréter les coefficients $\sigma_{1,2,3}$, on peut repartir des équations suivantes qui décrivent l'évolution des bilans énergétiques des deux réservoirs considérés :

$$\begin{cases} C_{At} \cdot \theta_{At}(t+1) &= C_{At} \cdot \theta_{At}(t) + \omega (\theta_{At}(t) - \theta_{Oc}(t)) + F(t) \\ C_{Oc} \cdot \theta_{Oc}(t+1) &= C_{Oc} \cdot \theta_{Oc}(t) - \omega (\theta_{At}(t) - \theta_{Oc}(t)) \end{cases}$$

avec:

- $\theta_{At}(t)$ température atmosphérique moyenne globale annuelle, à l'année t (°C)
- $\theta_{Oc}(t)$ température moyenne globale annuelle de l'océan, à l'année t (°C)
- C_{At} capacité calorifique de l'atmosphère (J.C⁻¹)
- C_{Oc} capacité calorifique de l'océan (J.C⁻¹)
- ω coefficient de transfert (J.C⁻¹)
- $F(t)$ apport de chaleur externe (J)

Ainsi, on peut constater que le coefficient σ_1 est proportionnel à l'inverse de la capacité thermique du compartiment supérieur (et directement proportionnel à la durée d'application du forçage, ici un an, et à la "surface" du compartiment) ; après calibrage (voir ci-après), il prend la valeur 0,479 C.W⁻¹.m². Le coefficient σ_2 est directement proportionnel au coefficient de transfert de chaleur entre les deux réservoirs ; après calibrage, il prend la valeur 0,109 C⁻¹.W.m². Le coefficient σ_3 est directement proportionnel au coefficient de transfert de chaleur entre les deux réservoirs et à l'inverse de la capacité thermique de l'océan de surface (en fait à la capacité thermique de la fraction de l'océan de surface qui échange avec l'atmosphère pendant un an) ; après calibrage, il prend la valeur 0,131.

Quels sont les mécanismes de rétroaction dont la résultante, négative, est représentée de manière synthétique par le paramètre λ ? Il s'agit de phénomènes nombreux, complexes et pouvant éventuellement présenter des effets de synergie (cf. [Houghton et al., 2001], chap. VII, "Physical Climate Processes and Feedbacks"). Une partie de l'énergie supplémentaire accumulée dans l'atmosphère à la suite d'un accroissement des concentrations des GES est réémise vers l'espace sous forme d'un rayonnement infrarouge : c'est donc une rétroaction *négative* qui tend à stabiliser la température de la Terre. Un ensemble de mécanismes contribue à en *moduler* les termes. Par exemple, la vapeur d'eau atmosphérique, le rôle ambivalent des nuages¹³, la participation de certains processus de surface susceptibles de modifier l'albedo (la glace de mer par exemple). Les incertitudes sur ces processus sont relativement importantes. Concernant les nuages par exemple, si des progrès non-négligeables ont été enregistrés en matière de modélisation, cette représentation plus raffinée des phénomènes dans les modèles ne permet pas de réduire l'incertitude associée aux rétroactions climatiques des nuages (même le signe en est inconnu). Une connaissance fine de ces procédés est souhaitable car les rétroactions atmosphériques contrôlent majoritairement la sensibilité du climat.

¹³ Entre leurs propriétés optiques dans le visible et l'effet albedo et leur propriétés optiques dans l'infrarouge et leur contribution à l'effet de serre (les nuages de haute altitude, dont la température sommitale est faible réémettent peu d'énergie vers l'espace - ils contribuent donc à l'effet de serre beaucoup plus que les nuages des basses latitudes).

II.3.3. Sensibilité du climat et incertitudes

L'écriture du modèle sous forme matricielle permet de calculer plus aisément la sensibilité du modèle. En posant

$$\theta(t) = \begin{bmatrix} \theta_{At}(t) \\ \theta_{Oc}(t) \end{bmatrix}, \quad A = \begin{bmatrix} 1 - \sigma_1(\lambda + \sigma_2) & \sigma_1\sigma_2 \\ \sigma_3 & 1 - \sigma_3 \end{bmatrix} \quad \text{et} \quad B_t = \sigma_1 \begin{bmatrix} F(t) \\ 0 \end{bmatrix},$$

on peut écrire :

$$\theta(t+1) = A\theta(t) + B_t.$$

On reconnaît une suite récurrente linéaire du premier ordre, à coefficients constants et avec second membre. Le calcul de la sensibilité du modèle peut dès lors s'effectuer facilement. On recherche en effet la température d'équilibre atteinte pour un forçage climatique constant (fixé au doublement de la concentration atmosphérique pré-industrielle de CO₂), c'est-à-dire

$$B_t = cte = B_{2x} = \sigma_1 \begin{pmatrix} \log\left(\frac{2M_{PI}}{M_{PI}}\right) \\ F_{2x} \\ 0 \end{pmatrix} = \sigma_1 \begin{pmatrix} F_{2x} \\ 0 \end{pmatrix}.$$

Sous réserve de propriétés de A (1 n'est pas valeur propre ou de manière équivalente, $(Id - A)$ inversible), il existe un état d'équilibre unique, noté θ_{2x} , donné par $\theta_{2x} = (Id - A)^{-1} \cdot B_{2x}$, ce qui est précisément la sensibilité du climat. Les calculs se conduisent aisément et sachant que

$$(Id - A)^{-1} = \frac{1}{\sigma_1\sigma_3\lambda} \begin{bmatrix} \sigma_3 & \sigma_1\sigma_2 \\ \sigma_3 & \sigma_1(\lambda + \sigma_2) \end{bmatrix},$$

il vient¹⁴ :

$$\theta_{2x} = \frac{1}{\sigma_1\sigma_3\lambda} \begin{bmatrix} \sigma_3 & \sigma_1\sigma_2 \\ \sigma_3 & \sigma_1(\lambda + \sigma_2) \end{bmatrix} \cdot \sigma_1 \begin{pmatrix} F_{2x} \\ 0 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \frac{F_{2x}}{\lambda} \\ \frac{F_{2x}}{\lambda} \end{pmatrix}.$$

La sensibilité du modèle dépend donc uniquement de F_{2x} , forçage radiatif instantané associé au doublement de la concentration atmosphérique pré-industrielle de CO₂, et de λ , facteur de rétro-contrôle climatique. L'incertitude sur la sensibilité du climat est importante, d'un facteur 3, et persiste depuis le deuxième rapport du GIEC: « *The equilibrium climate sensitivity (...) was estimated to be between +1,5 °C and +4,5 °C in the SAR. This range still encompasses the estimates from the current models in active use* » ([Houghton et al., 2001], chap. IX, p. 561). Cette incertitude provient de la méconnaissance des processus de rétroactions, surtout la rétroaction vapeur d'eau et ses liens avec la formation des nuages. Dans le cadre de notre

¹⁴ Au moment du calibrage, pour s'assurer de la convergence systématique vers l'équilibre et vérifier que les valeurs numériques correspondent bien aux phénomènes décrits, on s'assure que les valeurs propres de A sont bien réelles et positives (pas d'oscillations sous forçage croissant) et strictement comprises entre 0 et 1.

modèle simplifié, il est donc tout à fait acceptable de faire l'hypothèse que l'incertitude sur la sensibilité du climat provient uniquement de l'incertitude sur λ .

Plusieurs approches peuvent être utilisées pour évaluer la sensibilité du climat et donner une estimation de l'incertitude associée¹⁵ :

- le sondage d'experts [*Morgan et Keith, 1995*] ;
- l'utilisation des modèles climatiques - soit par analyse et comparaison des résultats des modèles de circulation générale (comme dans les expériences CMIP 1 & 2 - voir [*Houghton et al., 2001*], chap. IX), soit par l'emploi de modèles plus conceptuels¹⁶ pour tester à partir d'un seul modèle, des hypothèses alternatives sur les forçages des différents GES, les rétroactions au sein du système climatique, la représentation des nuages [*Webster et al., 2002*] ;
- l'utilisation des données météorologiques (recueillies de manière exploitable depuis quelques 150ans) [*Andronova et Schlesinger, 2001; Forest et al., 2002*] ou pour des séries sur des périodes plus longues, l'utilisation de reconstructions paléoclimatiques [*Hoffert et Covey, 1992*] (ces deux dernières approches faisant intervenir des techniques d'estimations statistiques à l'aide d'un modèle climatique plus ou moins élaboré).

Chacune de ces approches conduit à des estimations différentes :

- dans son dernier rapport, le GIEC donne l'intervalle [+2,0 C;+5,1 °C] (moyenne : +3,5 °C, écart-type : +0,92 °C), estimé à partir des résultats de 15 modèles de circulation générale ([*Houghton et al., 2001*], table 9.4).
- l'utilisation des observations météorologiques aboutit pour [*Andronova et Schlesinger, 2001*] à une distribution concentrée à gauche (moyenne : +3.4 °C, médiane : 2.04 °C, écart-type : +3.85 °C) : intervalle de confiance à 90% de [+1,0 C;+9,3 °C], avec une probabilité d'être en dehors de l'intervalle du GIEC de 0,33 par en-dessous et 0,21 par au-dessus. [*Forest et al., 2002*] propose une distribution également concentrée à gauche mais plus resserrée autour de l'intervalle du GIEC (moyenne : +3.5 °C, médiane : 2.9 °C) : intervalle de confiance à 5-95% de [+1,4 C;+7,7 °C], avec une probabilité d'être en dehors de l'intervalle du GIEC de 0,1 par en-dessous et 0,23 par au-dessus.
- l'analyse des données paléoclimatiques conduit, quant à elle, à l'intervalle [+1,4 C;+3,2 °C]. Ces estimations sont citées à titre de comparaison et ne sont pas les plus appropriées pour étudier l'effet de serre d'origine anthropique parce que la composition chimique de l'atmosphère (en particulier pour le calcul des forçages radiatifs) et les caractéristiques des climats ne sont pas systématiquement comparables aux situations présentes et futures.

Pour rendre compte de l'incertitude sur la sensibilité du climat dans le modèle *RESPONSE*, nous avons retenu les estimations qui s'appuient sur les GCMs ou les observations météorologiques - pour les raisons que nous venons d'exposer - et avons considéré les principes suivants. Dans l'ensemble, la moyenne est +3,5 °C et les estimations récentes indiquent que la distribution semble plutôt concentrée à gauche (valeurs faibles de la sensibilité) mais n'excluent pas le risque de mauvaise surprise. De manière synthétique, nous explorons trois valeurs pour la sensibilité du climat, centrées autour de l'estimation moyenne de ce paramètre, {+2,5 °C ; +3,5 °C ; +4,5 °C} et nous avons choisi une distribution symétrique avec les probabilités suivantes {1/6; 2/3; 1/6}. En définitive, cette distribution peut être qualifiée de

¹⁵ Pour une revue rapide de ces différentes méthodes et des incertitudes associées, voir par exemple [*Schlesinger et Andronova, 2000*] et [*the National Academies, 2003*].

¹⁶ Et une des premières tentatives est celle du Suédois S. Arrhenius, en 1896, qui trouvait une sensibilité égale à +5,4 °C [*Arrhenius, 1896*].

relativement neutre ou de non-catastrophiste ; pour certaines analyses de sensibilité, nous testerons des distributions alternatives qui donnent davantage de poids à de mauvaises nouvelles. Les valeurs correspondantes pour le paramètre λ sont les suivantes: $\{1,48 \text{ C}^{-1} \cdot \text{W} \cdot \text{m}^{-2}; 1,06 \text{ C}^{-1} \cdot \text{W} \cdot \text{m}^{-2}; 0,82 \text{ C}^{-1} \cdot \text{W} \cdot \text{m}^{-2}\}$.

II.3.4. Calibrage du modèle

Notre modèle comporte 8 paramètres : σ_1 , σ_2 , σ_3 , λ , F_{2x} , M_{pr} et les deux températures moyennes annuelles globales à la période pré-industrielle à partir desquelles sont mesurées les variations de température, $\Theta_{At}(PI)$ et $\Theta_{Oc}(PI)$. Le calibrage a été effectué à partir des résultats d'une simulation exécutée sur le modèle couplé de l'IPSL, en forçage transitoire (données aimablement fournies par P. Friedlingstein (LSCE/IPSL), data set : climcarb/LF8/tauco2_LF8_1860_2100.dat).

Trois séries de variables climatiques annuelles (de 1860 à 2100) ont servi (voir Figure IV-2):

- la température moyenne annuelle de l'atmosphère sur les continents (pour donner une mesure de l'effet rapide du réchauffement de l'atmosphère et des terres émergées, effet non perturbé par l'inertie thermique du réservoir océanique), qui représente ici la température moyenne annuelle globale du compartiment supérieur, $\theta_{At}(\cdot)$,
- la température moyenne annuelle de l'atmosphère sur les océans, qui représente ici la température moyenne annuelle de l'océan de surface à l'interface avec l'atmosphère, $\theta_{Oc}(\cdot)$,
- et l'évolution de la concentration atmosphérique annuelle de CO_2 .

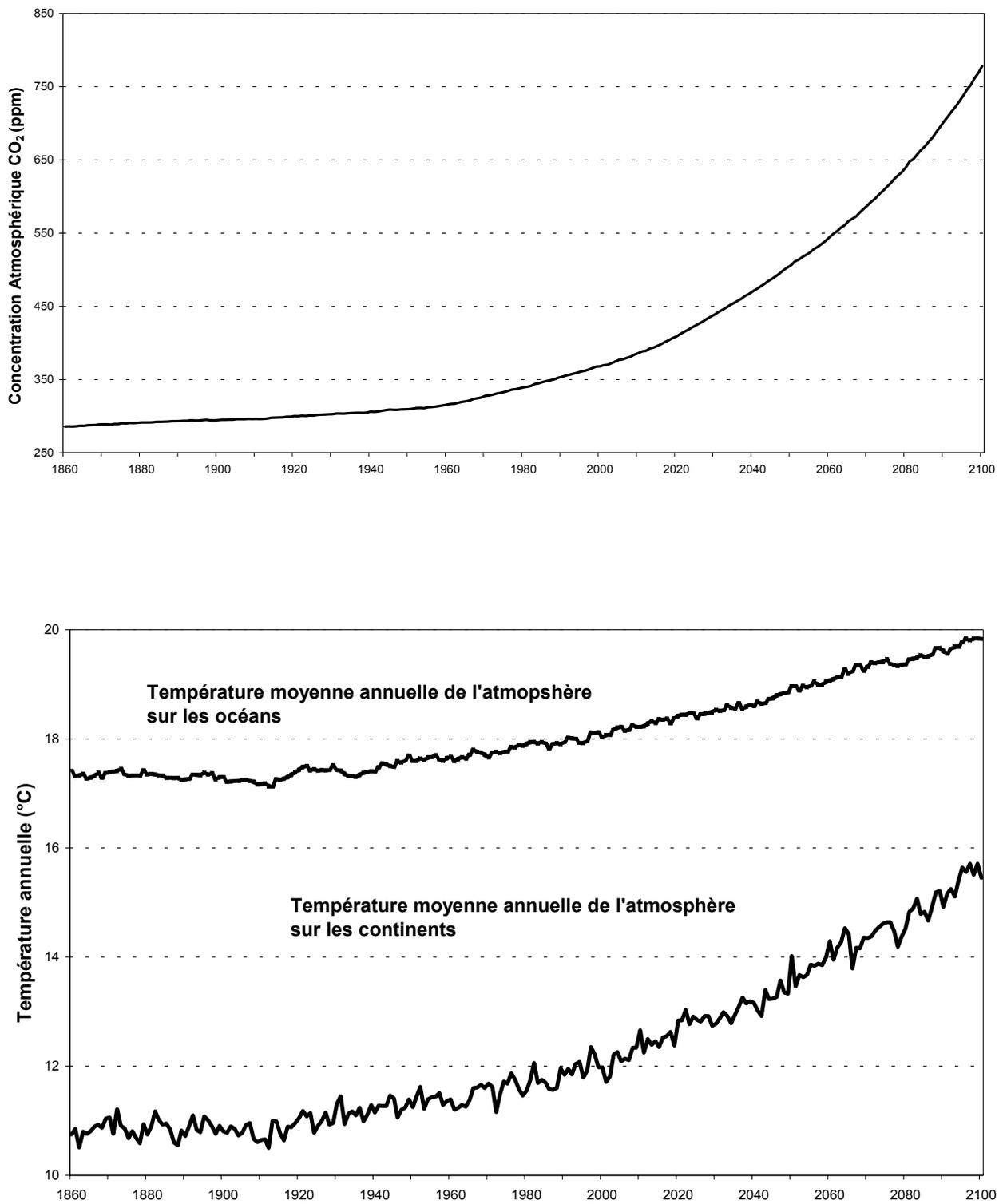


Figure IV-2. Données du calibrage du modèle de température.

En haut, concentration atmosphérique de CO₂; en bas, température moyenne annuelle de l'atmosphère sur les océans et sur les continents.

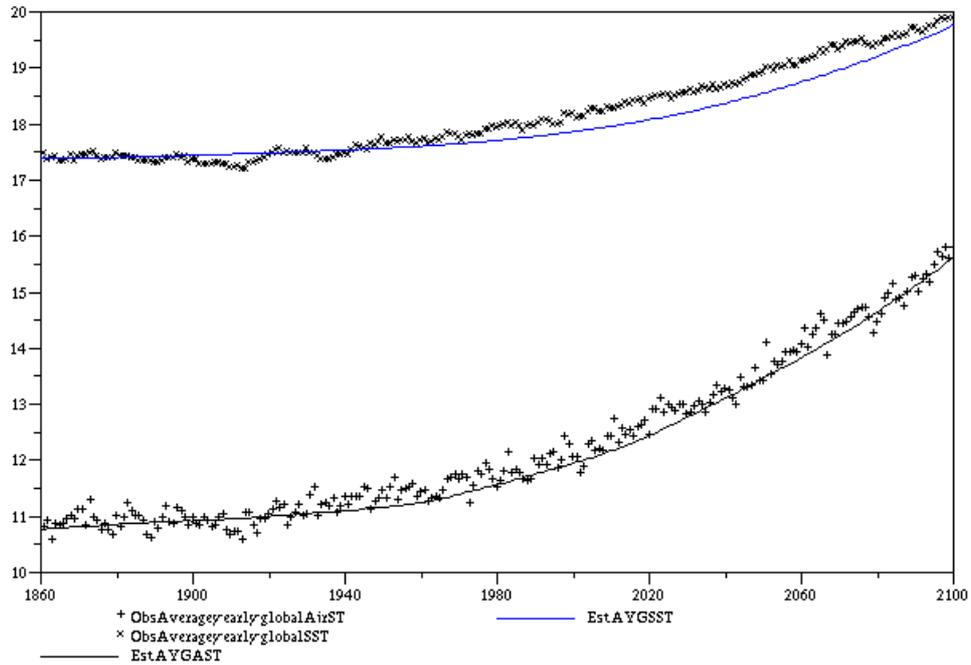


Figure IV-3. Calibrage du modèle de température (pas de temps annuel).

Les séries de points correspondent aux données (simulation du modèle de l'IPSL) et les courbes aux résultats du calibrage. En haut, données pour l'océan de surface ; en bas, pour l'atmosphère.

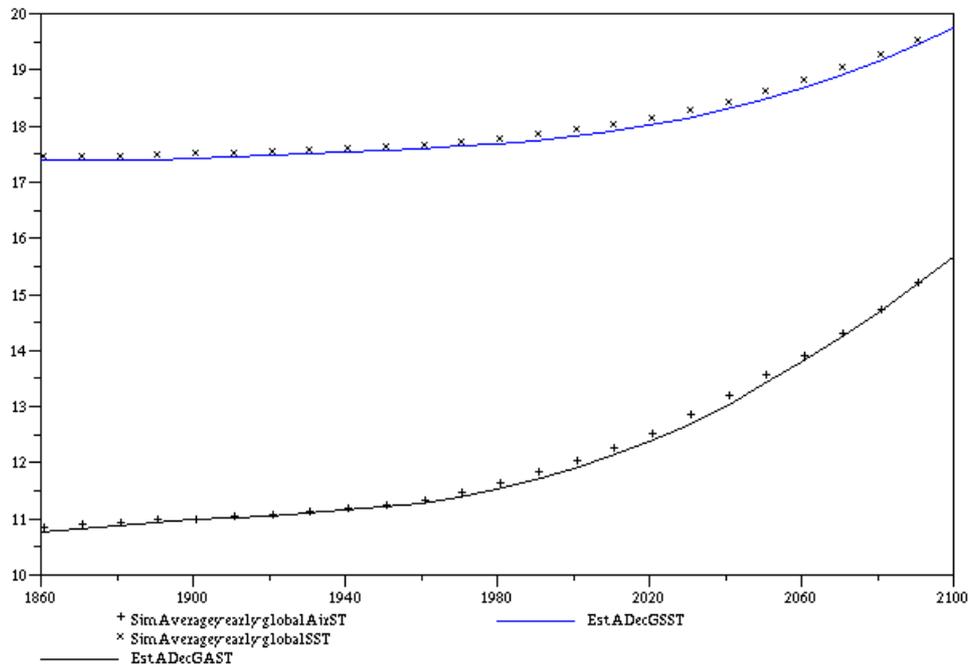


Figure IV-4. Calibrage du modèle de température (pas de temps décennal).

Les courbes correspondent aux simulations à l'aide du modèle décennal, les séries de points aux résultats du calibrage. En haut, données pour l'océan de surface ; en bas, pour l'atmosphère.

On a retenu pour M_{pr} et F_{2x} les valeurs énoncées auparavant. Les valeurs des températures moyennes annuelles à la période pré-industrielle, $\Theta_{Ar}(PI)$ et $\Theta_{Oc}(PI)$, ont été obtenues à partir d'un calibrage aux moindres carrés sur la seule équation de l'évolution de la température de l'océan de surface. On obtient respectivement $\Theta_{Ar}(PI) = +10,7 \text{ } ^\circ\text{C}$ et $\Theta_{Oc}(PI) = +17,38 \text{ } ^\circ\text{C}$. On retrouve que la température moyenne de surface des continents est plus basse que la température moyenne de surface des océans, en raison de leur extension majoritaire vers les hautes latitudes de l'hémisphère Nord. Dans un climat non perturbé, c'est bien l'océan qui joue un rôle central en distribuant la chaleur vers les hautes latitudes à destination de l'atmosphère et des continents. Avec un forçage additionnel par perturbation du bilan radiatif de l'atmosphère, ce rapport ne s'inverse pas mais le réchauffement (la variation de température) est plus important sur les continents que sur les océans, en raison de la plus faible inertie thermique des premiers.

La valeur de σ_3 obtenue à cette occasion a été réinjectée dans un calibrage complet des deux équations pour déterminer les valeurs de σ_1 , σ_2 , σ_3 , λ . On trouve finalement $\sigma_1 = 0,5044639 \text{ C.W}^{-1}.\text{m}^2$, $\sigma_2 = 0,5169626 \text{ C}^1.\text{W}.\text{m}^{-2}$, $\sigma_3 = 0,0119133$, $\lambda = 0,8195392 \text{ C}^1.\text{W}.\text{m}^{-2}$. C'est à dire que le modèle utilisé pour le calibrage a une sensibilité relativement élevée, proche de $+4,5 \text{ } ^\circ\text{C}$. Pour étendre le modèle à d'autres valeurs de la sensibilité du climat (ici, $+2,5 \text{ } ^\circ\text{C}$ et $+3,5 \text{ } ^\circ\text{C}$), on ne modifie que la valeur du paramètre représentant les rétroactions atmosphériques, λ , en l'ajustant avec l'expression $\lambda = F_{2x} / \theta_{2x}$; les autres paramètres, liés aux capacités thermiques des réservoirs, sont considérés comme constants.

Le résultat du calibrage est représenté Figure IV-3. Les séries de points correspondent à la simulation du modèle de l'IPSL et les courbes correspondent à l'évolution des températures obtenues pour le modèle calibré¹⁷. Le modèle économique dans lequel est intégré ce module d'évolution de la température a un pas de dix ans. Il est donc nécessaire de calibrer un modèle d'évolution de la température de résolution décennale. Nous sommes repartis des sentiers d'évolution de la température obtenus pour un modèle annuel pour calibrer un modèle décennal similaire avec pour seules inconnues : σ_1 , σ_2 , σ_3 . On trouve finalement : $\sigma_1 = 0,4791321 \text{ C.W}^{-1}.\text{m}^2$, $\sigma_2 = 0,1093877 \text{ C}^1.\text{W}.\text{m}^{-2}$, $\sigma_3 = 0,1313768$. Le résultat du calibrage est représenté Figure IV-4. Les séries de points correspondent aux trajectoires obtenues à partir du modèle annuel calibré par nos soins et les courbes correspondent à l'évolution des températures obtenues pour le modèle décennal.

Un dernier couple de valeurs reste à déterminer : la variation des températures moyennes décennales entre la date de départ du modèle *RESPONSE* (1990) et la période pré-industrielle. C'est une donnée incertaine : il s'agit de la tendance de réchauffement moyen global et l'effet de masque de la variabilité inter-annuelle du climat (et l'incertitude sur la mesure, surtout plus on s'éloigne du présent) impacte directement sur nos possibilités de l'évaluer avec certitude¹⁸. Sa valeur n'est pas indépendante des hypothèses formulées sur la dynamique du climat, sur les forçages subis pendant cette période, grandeurs toutes relativement incertaines et dont l'incertitude se répercute sur la sensibilité du climat. Pour traduire ces liens de dépendance, on fait les hypothèses suivantes. La variation des températures moyennes décennales entre 1980 et la période pré-industrielle est estimée à partir du modèle décennal précédemment calibré, on

¹⁷ Notre modèle donne la variation de la température depuis la période pré-industrielle, θ : les courbes ont donc été obtenues en additionnant aux évolutions simulées par le modèle la température pré-industrielle, Θ_{pr} .

¹⁸ Ainsi l'estimation du GIEC, dans son dernier rapport : « *The global average surface temperature has increased by 0.6 +/- 0.2°C since the late 19th century* » (Houghton et al., 2001), TS, B.1).

trouve $\theta(1980) = \left[\begin{matrix} 0,82 \\ 0,30 \end{matrix} \right] (\text{°C})$. Aux décennies suivantes, en particulier 1990, la date de départ,

ces variations vont dépendre des hypothèses sur la sensibilité du climat. Elles sont donc différentes selon les états du monde. Cela peut paraître surprenant mais il faut se rappeler qu'il s'agit de grandeurs qui ne sont pas directement observables (comme la température moyenne globale annuelle) mais de grandeurs reconstruites : compte tenu de l'incertitude sur la détection du signal et sur la dynamique du climat, le planificateur central envisage trois valeurs différentes qu'il ne peut réellement discriminer qu'au bout d'un certain temps.

II.3.5. Validation du modèle climatique

Enfin, dans l'optique de valider le modèle climatique au sein du module environnemental de *RESPONSE* (cycle du carbone et évolution de la température), nous avons comparé les résultats obtenus avec celui-ci aux résultats du modèle *IMAGE 2.2* [the *IMAGE team*, 2001] pour les marqueurs respectifs des quatre scénarios SRES. A chaque fois, nous avons entrepris trois simulations avec notre modèle selon la valeur de la sensibilité du climat. La Figure IV-5 présente les résultats pour le scénario A1 (notre référence). L'allure générale des courbes y est identique et les trois simulations avec le modèle *RESPONSE* encadrent la projection du modèle *IMAGE*. Nous avons porté également sur la figure les résultats (en 2030 et en 2100) pour les sept modèles climatiques réduits employés par le GIEC. On peut constater que nos projections cadrent raisonnablement avec l'enveloppe du scénario A1.

II.4. Objectif d'optimisation

Le modèle recherche le vecteur d'efforts de réduction des émissions de CO₂ qui minimise le coût inter-temporel des politiques climatiques sous contraintes environnementales. Le critère à minimiser est le suivant :

$$\text{Min}_{Ab_t} \sum_{t=1990}^{2300} \frac{f(Ab_t, Ab_{t-1}, t)}{(1 + \rho)^{(t-1990)}}$$

où ρ désigne le taux d'actualisation, pris à 5%.an⁻¹ dans le cas central.

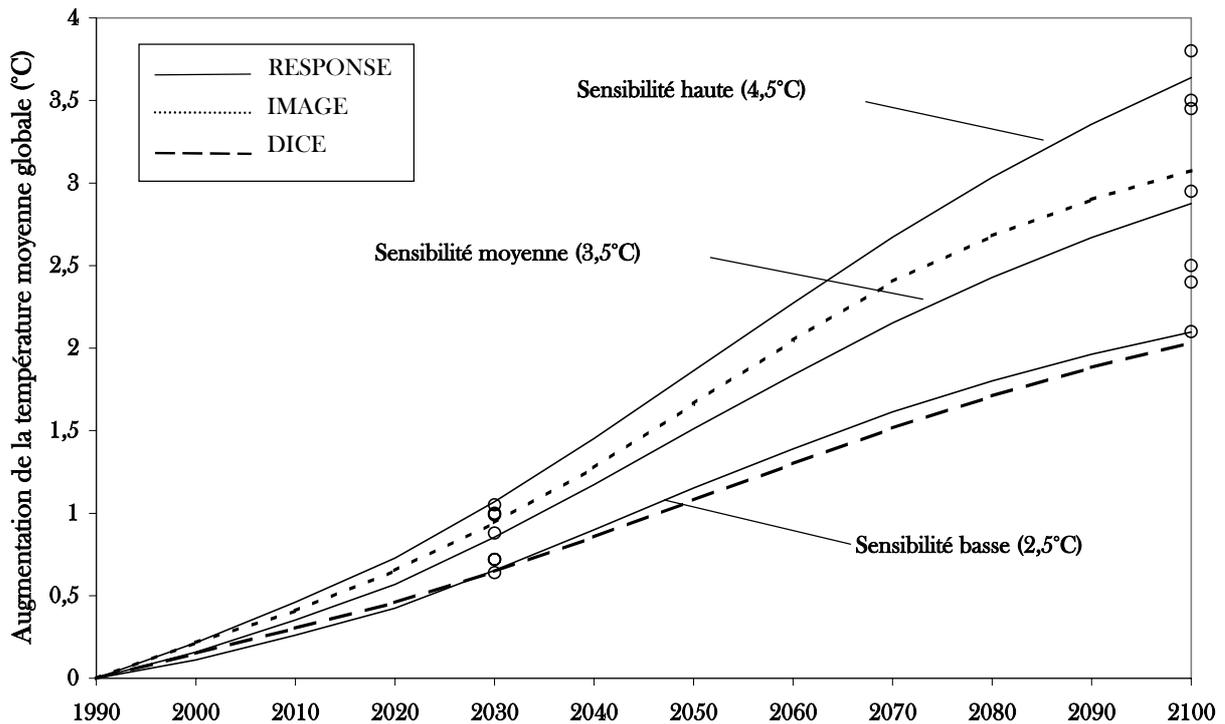


Figure IV-5. Comparaison des réponses climatiques *RESPONSE*, *IMAGE* et *DICE*.

La figure représente pour le marqueur du scénario A1, l'augmentation de la température moyenne globale de l'atmosphère obtenue avec le modèle climatique de *RESPONSE* pour les trois valeurs de la sensibilité du climat prises en compte (trait plein), le modèle climatique du modèle *IMAGE* (pointillés) et le modèle climatique du modèle *DICE* (tirets). On a également porté sur la figure les résultats obtenus par le GIEC pour sept modèles de climat simplifiés, calibrés à partir des caractéristiques de sept GCMs, en 2030 et 2100 (cercles). On peut constater que le modèle climatique du modèle *DICE*, bien qu'ayant une sensibilité climatique proche de 3°C, donne une projection basse, très proche de l'enveloppe inférieure des projections du GIEC; ceci est dû au choix des compartiments du modèle (atmosphère+océan de surface/ océan profond) qui conduit à sous-estimer le réchauffement global.

Nous avons introduit deux contraintes environnementales :

- une contrainte sur l'amplitude du réchauffement ($\Delta\theta_{MAX}$ vaut +2°C dans le cas central):

$$\forall t, (\theta_{At}(t) - \theta_{At}(1990)) \leq \Delta\theta_{MAX}$$

- une contrainte de limitation du rythme décennal d'évolution de la température (fixée à 0,3°C.décennie⁻¹ dans le cas central):

$$\forall t, t \geq 2010, (\theta_{At}(t+10) - \theta_{At}(t)) \leq \Delta_{RYT}$$

Enfin, la date de départ étant 1990, nous avons contraint l'abattement de première période à être nul. La première date à laquelle il est possible d'abattre est donc 2000. Comme on ne peut commencer à agir qu'à partir de 2000, on ne peut modifier la concentration atmosphérique de CO₂ qu'à partir de 2010 et l'évolution du climat qu'à partir de 2020. Autrement dit, son rythme est prescrit pour les deux premières décennies. Pour éviter des chocs dans la réponse du modèle, nous avons relâché la contrainte qui lui est associée pendant ces deux périodes.

Il s'agit d'un modèle en temps discret, résolu avec un pas de dix ans. La date initiale est l'année 1990. Nous examinons les résultats jusqu'en 2100. L'horizon de simulation est beaucoup plus lointain, 2300 de manière à nous protéger ainsi contre les effets de bord qui seraient observés si la date finale du modèle était plus proche de 2100 [Kolstad, 1994]. Le modèle est écrit en langage GAMS et résolu à l'aide du solveur non-linéaire MINOS. Le code en est disponible en Annexe.

III. Analyse de sensibilité du modèle RESPONSE_Θ - réponse optimale en univers certain

Dans cette section, nous entreprenons une analyse de sensibilité du modèle RESPONSE_Θ. Nous nous sommes concentrés sur les paramètres les plus déterminants pour les politiques de précaution dans le contexte de la stabilisation des concentrations, à savoir le taux d'actualisation, ρ , le degré d'inertie socio-économique, τ , et le progrès technique (son taux de pénétration), et à des paramètres nouveaux, puisque nous passons de contraintes en concentration à des contraintes en température, à savoir la sensibilité du climat, θ_{2x} , et l'impact des contraintes climatiques que nous avons introduites, $\Delta\theta_{MAX}$ et Δ_{RYT} . Sauf indication contraire, les valeurs de référence sont les suivantes : $\rho = 0,05 \text{ \%.an-1}$, $\tau = 0,05 \text{ an-1}$, taux annuel de pénétration du progrès technique = 1 \%.an-1 , $\theta_{2x} = +3,5 \text{ }^\circ\text{C}$, $\Delta\theta_{MAX} = 2 \text{ }^\circ\text{C}$ et $\Delta_{RYT} = 0,3 \text{ }^\circ\text{C.décennie}^{-1}$.

III.1. Réponse optimale du modèle et taux d'actualisation

Les politiques climatiques auront des conséquences pour les générations présentes et les générations futures et toute décision - en terme d'effort de réduction des émissions demandé à chaque génération - reflète une pondération implicite ou explicite des générations. Dans le cadre de notre modèle, le taux d'actualisation permet de rendre explicite cette pondération. Une valeur élevée du taux d'actualisation diminue la valeur actualisée des coûts futurs et se traduit ainsi par une tendance à repousser les efforts de réduction des émissions vers le futur. Le choix d'une valeur appropriée pour le taux d'actualisation est l'occasion de nombreux débats entre les tenants d'une référence aux marchés financiers qui plaident pour l'adoption d'une valeur entre 8 et 10 % et les tenants d'une équité inter-générationnelle forte qui plaident pour l'adoption d'une valeur beaucoup plus faible. Pour refléter ce large éventail nous avons utilisé quatre valeurs du taux d'actualisation : 1%, 3%, 5% et 10%.

La Figure IV-6 représente la réponse optimale du modèle pour ces quatre valeurs, les autres paramètres étant fixés à leur valeur centrale. Sans surprise, on constate le très fort impact du choix du taux d'actualisation sur le profil de la réponse optimale. Une valeur faible se traduit par une progression lisse des efforts ; à l'inverse une valeur élevée conduit à repousser les efforts vers les générations futures (efforts devenant d'autant plus importants que le stock atmosphérique de GES a continué à croître pendant les premières périodes). Cependant, en termes de volume d'émissions cumulées, indicateur lié au niveau de protection de l'atmosphère et du climat à long-terme, les différences entre trajectoires s'estompent avec le temps : elles sont nettes autour de 2050 (pour des valeurs croissantes du taux d'actualisation, on passe successivement de 74 à 70, 67 et 61 GtC) et quasiment inexistantes en 2100 (respectivement,

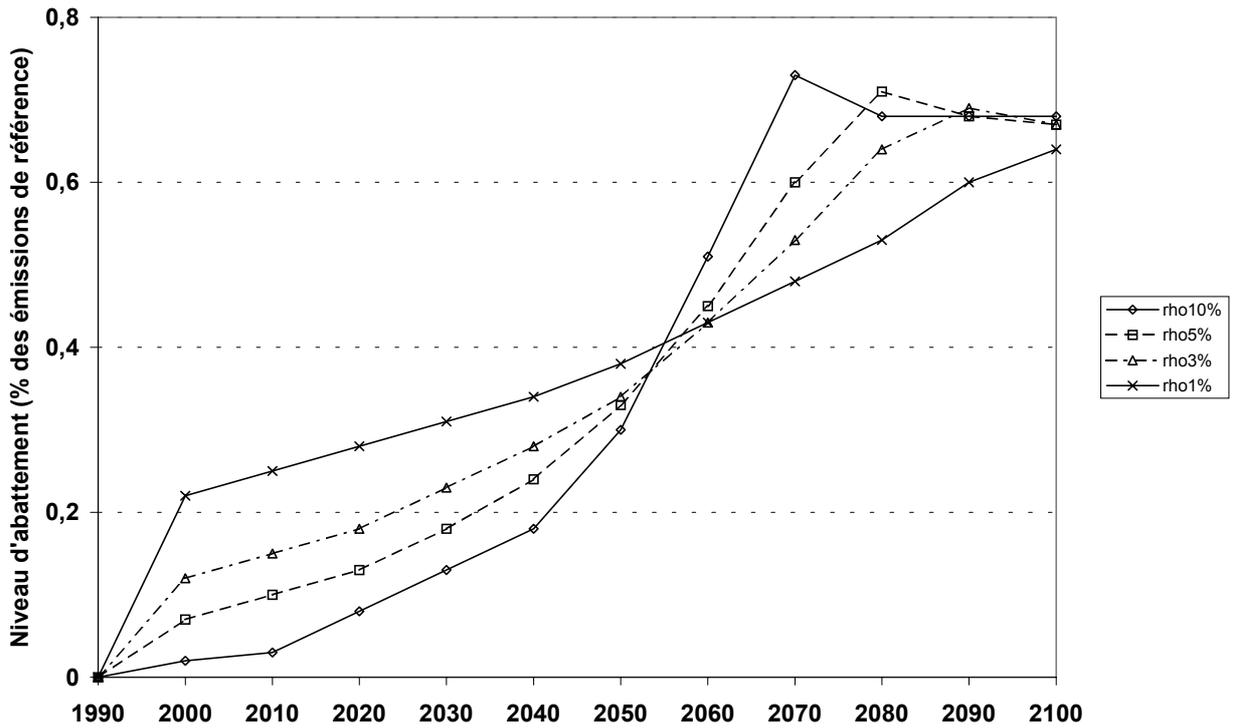


Figure IV-6. Sensibilité de la trajectoire optimale d'abattement au taux d'actualisation.

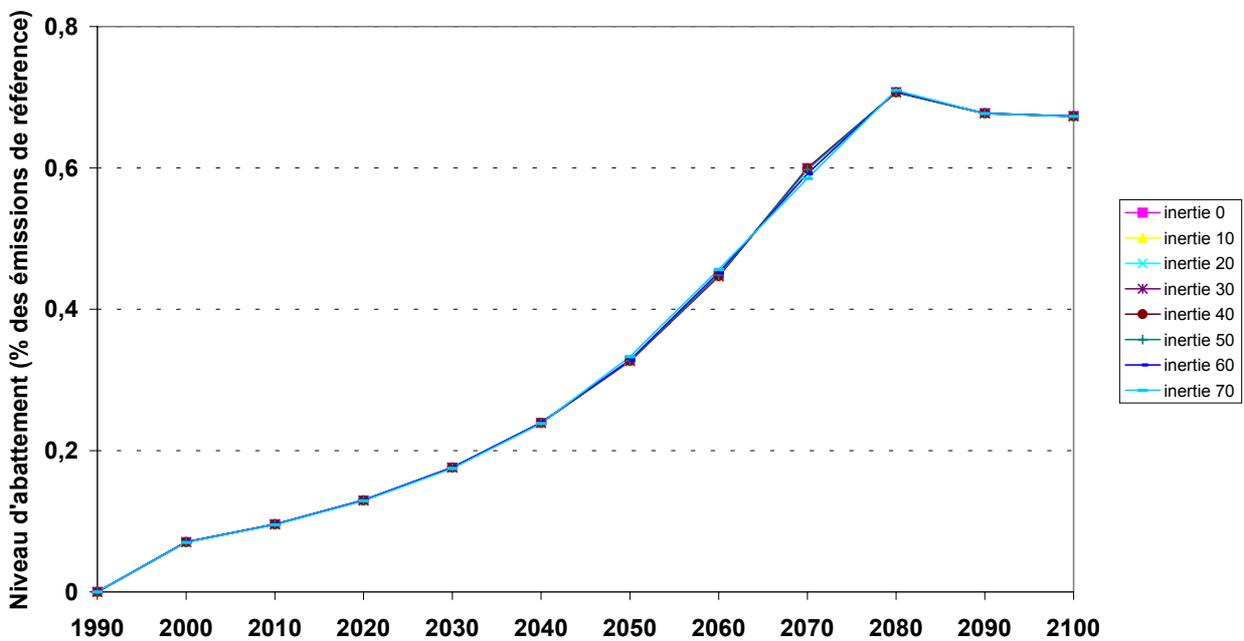


Figure IV-7. Sensibilité de la trajectoire optimale d'abattement au degré d'inertie socio-économique.

100, 99, 98 et 96 GtC). Autrement dit, dans un cadre coût efficacité, le taux d'actualisation agit surtout sur la répartition dans le temps du budget carbone plus que sur son volume.

III.2. Réponse optimale du modèle et inerties socio-économiques

Les systèmes socio-économiques sont caractérisés par une forte inertie en ce sens qu'une modification rapide de leur structure - comme de passer d'un mode de développement fondé sur le primat des énergies fossiles à un mode alternatif laissant davantage de place aux énergies renouvelables - implique des coûts supplémentaires, associés aux phénomènes de transition. L'existence de fortes inerties dans le secteur énergétique et la structure de la demande finale d'énergie a tendance à faire s'échelonner les efforts de réduction des émissions de sorte que leur rythme n'implique pas de renouvellement anticipé du capital émetteur, de restructuration à un rythme forcé des industries productrices d'énergie ou des infrastructures et des tissus urbains. Elle se traduit donc par un effet *ritardando*, d'autant plus fort que le degré d'inertie est élevé. En même temps, l'inertie socio-économique pousse à commencer les efforts de réduction plus tôt pour éviter de faire face à des coûts de transition trop élevés dans l'avenir afin de satisfaire la contrainte environnementale. Elle se traduit donc par un effet *accelerando*, d'autant plus fort que le degré d'inertie est élevé.

L'équilibre entre ces deux effets antagonistes est affaire de vérification empirique. Dans un premier temps, nous examinons la réponse optimale du modèle pour une large gamme d'inertie socio-économique : de 10 à 70 ans ainsi qu'une situation sans inertie socio-économique. Les résultats, présentés Figure IV-7, montrent que le modèle est peu sensible aux spécifications de l'inertie dans la gamme explorée. On observe pour des valeurs élevées de l'inertie (à partir de 60 ans) un très faible effet *accelerando* qui se manifeste dans une fenêtre allant de 2040 à 2060. Un élément d'explication peut être le suivant : *ceteris paribus*, la contrainte environnementale est satisfaite sans mordre sur la contrainte d'inertie (ne pas remplacer le capital plus rapidement que son taux de renouvellement naturel). Pour vérifier cette hypothèse, nous avons calculé pour les 7 niveaux d'inertie envisagés le rapport entre la vitesse d'augmentation décennale de l'abatement et le taux de renouvellement décennal naturel du capital. Si ce rapport est supérieur à 1, alors la contrainte d'inertie mord. Dans tous les cas, ce rapport est inférieur à 1 ; il se rapproche de 1 pour les fortes valeurs de l'inertie dans la fenêtre temporelle considérée.

Un élément d'analyse supplémentaire peut être l'examen du jeu relatif entre inertie socio-économique et taux d'actualisation. On a vu précédemment que plus le taux d'actualisation était élevé, plus les efforts avaient tendance à être repoussés au delà de 2050. On a vu également que, pour les spécifications précédemment étudiées, l'inertie socio-économique n'influait que peu le profil temporel de la réponse optimale mais quand elle se manifestait, c'était par un effet *accelerando*. Qu'en est-il pour des taux d'actualisations très bas (1%) et très élevés (10%) ?

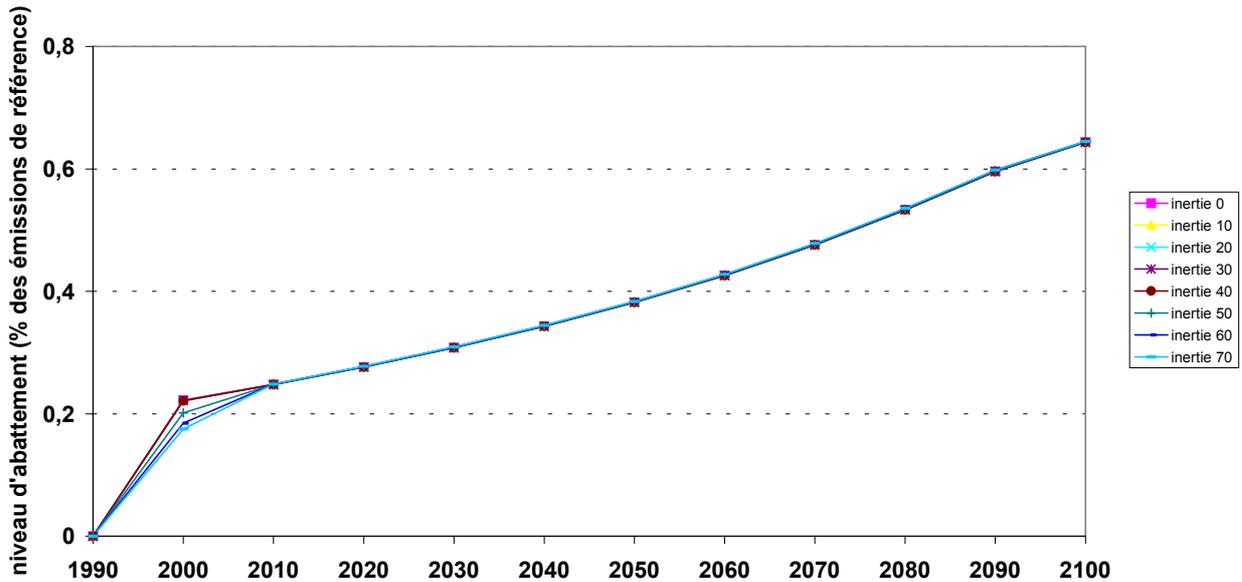


Figure IV-8. Sensibilité de la trajectoire optimale d'abattement au jeu relatif degré d'inertie socio-économique/ taux d'actualisation (taux faible : 1%.an⁻¹).

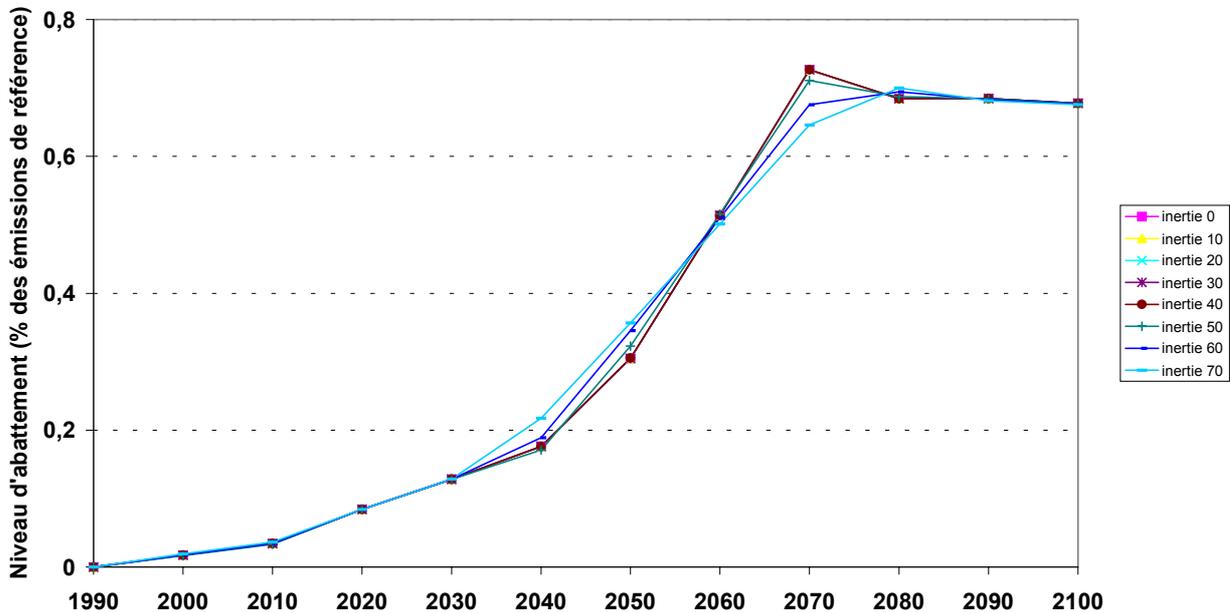


Figure IV-9. Sensibilité de la trajectoire optimale d'abattement au jeu relatif degré d'inertie socio-économique/ taux d'actualisation (taux fort : 10%.an⁻¹).

La Figure IV-8 présente les résultats obtenus pour un taux d'actualisation fixé à 1 % et pour des niveaux d'inertie variant de 10 à 70 ans ainsi qu'un cas polaire avec une inertie nulle. On peut constater à nouveau la forte dominance du taux d'actualisation sur le degré d'inertie socio-économique : à nouveau les courbes ont toutes des profils similaires. Néanmoins, pour des valeurs élevées de l'inertie (à partir de 50 ans), on peut constater que l'effet *ritardando* de l'inertie se manifeste : l'abattement en 2000 est inférieur (jusqu'à près de 20%) pour ces valeurs de l'inertie à ce qui est observé dans tous les autres cas. Quand on calcule pour l'année 2000 le rapport entre la vitesse d'augmentation décennale de l'abattement et le taux de renouvellement décennal naturel du capital, on trouve effectivement qu'il est supérieur à 1 pour des valeurs de l'inertie supérieures à 50 ans. Cet effet ne se propage pas à d'autres dates. Il est possible qu'il s'agisse d'un artefact lié aux conditions de première période. En effet, l'abattement en 1990 est nul or avec un faible taux d'actualisation, les efforts commencent plus tôt, sont importants et se traduisent par une accélération non négligeable.

Pour un taux d'actualisation très élevé (10%), c'est l'autre effet de l'inertie qui se manifeste, pour des valeurs élevées de ce paramètre (voir Figure IV-9). En effet, un taux d'actualisation élevé repousse les efforts au delà de 2050, ce qui se traduit par une forte augmentation du niveau d'abattement entre 2030 et 2070. Dans certains cas, la contrainte d'inertie mord et se manifeste par des efforts plus importants plus tôt pour écrêter le pic d'abattement vers 2070. Pour une inertie de 70 ans, l'abattement en 2040 est plus élevé de 23% par rapport à une situation sans inertie et en 2070 plus faible de 11%.

En conclusion, en univers certain l'effet du taux d'actualisation domine très largement le rôle de l'inertie, qui ne se manifeste très légèrement que pour des niveaux élevés d'inertie. Pour un taux d'actualisation faible, qui pousse à étaler les efforts et à commencer le plus tôt possible, l'effet *ritardando* de l'inertie se manifeste (à seulement une date). Pour un taux d'actualisation élevé, qui pousse à retarder les efforts, l'effet *accelerando* de l'inertie se manifeste pour inciter à abattre plus précocement, dans la fenêtre 2030-2070.

III.3. Réponse optimale du modèle et progrès technique autonome

L'effet du progrès technique se traduit par une diminution des coûts d'abattement avec le temps, d'autant plus prononcée que son rythme est élevé. Il influence donc la stratégie optimale en repoussant les efforts d'abattements vers le futur, puisque pour une même intensité d'effort, les coûts seront plus faibles.

Dans un premier temps, nous avons étudié l'influence du progrès technique sur le profil temporel des efforts d'abattement pour une inertie socio-économique faible (20 ans) et un taux d'actualisation faible (1%), deux facteurs qui jouent dans le sens d'une action précoce. L'analyse de sensibilité porte sur le rythme de pénétration du progrès technique et nous considérons trois valeurs : 0,5, 1 et 1,5 $\%.\text{an}^{-1}$. Les résultats sont présentés Figure IV-10. On peut constater que l'influence du progrès technique est dominée par le taux d'actualisation, qui dicte l'allure générale des courbes. Son effet se fait néanmoins sentir : en première période, l'abattement correspondant à un rythme du progrès technique de 0,5 $\%.\text{an}^{-1}$ est de 20% supérieur au niveau d'abattement correspondant au cas 1,5 $\%.\text{an}^{-1}$; à l'inverse en dernière période, l'abattement pour un rythme du progrès technique de 1,5 $\%.\text{an}^{-1}$ est supérieur de 5% à l'abattement correspondant à une situation où le rythme du progrès technique est le plus lent. Cet effet est cependant largement écrasé par le taux d'actualisation : pour un taux de 10%, les mêmes spécifications n'induisent plus que des différences très faibles (résultat non montré ici).

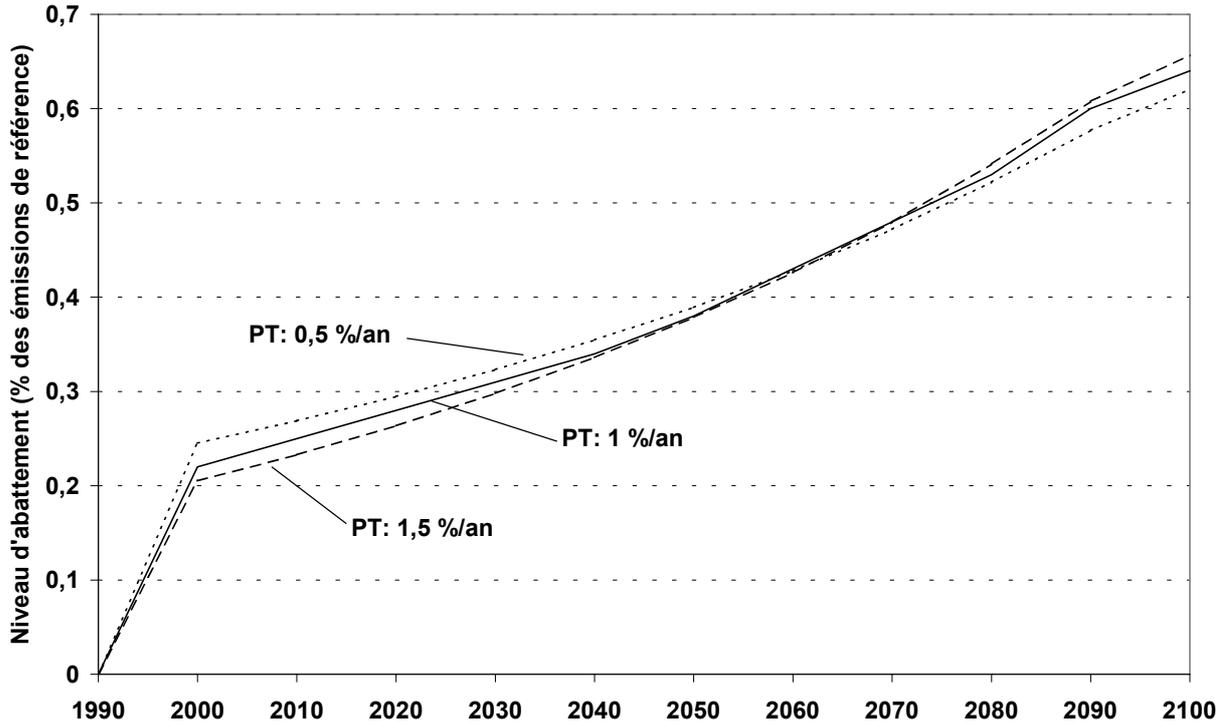


Figure IV-10. Sensibilité de la trajectoire optimale d'abattement au rythme de pénétration du progrès technique.

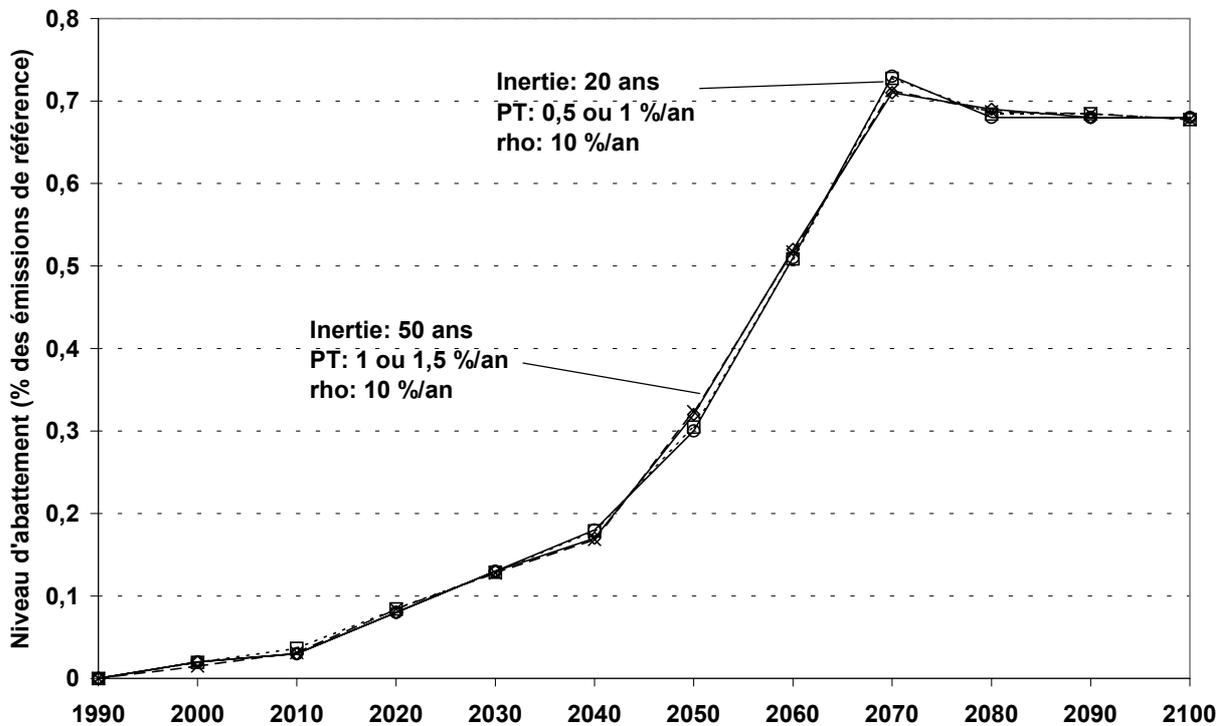


Figure IV-11. Sensibilité de la trajectoire optimale d'abattement au jeu relatif taux d'actualisation/degré d'inertie socio-économique/rythme de pénétration du progrès technique.

Nous avons entrepris une dernière comparaison, qui confirme la domination du taux d'actualisation sur l'inertie socio-économique et le rythme du progrès technique. Nous avons considéré deux cas polaires pour un taux d'actualisation élevé (10%) : une inertie faible, 20 ans (action tardive), associée à un rythme du progrès technique faible, 0,5%.an-1 (action précoce), et à l'inverse une inertie forte, 50ans (action précoce), jointe à un rythme du progrès technique fort, 1,5%.an-1 (action tardive). Ces deux simulations ont été comparées aux cas centraux suivants : taux d'actualisation 10%, rythme du progrès technique 1%.an-1 et deux degrés d'inertie 20 et 50 ans. On peut constater (voir la Figure IV-11) que l'effet du rythme du progrès technique est dominé par celui de l'inertie (qui joue ici son rôle *accelerando*), lui même très largement dominé par le taux d'actualisation.

III.4. Réponse optimale du modèle et sensibilité du climat

Nous avons étudié l'impact de la sensibilité du climat sur la réponse optimale du modèle en considérant trois valeurs : 2,5 °C ; 3,5 °C et 4,5 °C. Avant de continuer, remplaçons ces trois valeurs par rapport aux plafonds de concentrations couramment utilisés dans des analyses coût-efficacité (450 ppm, 550 ppm, 650 ppm). En ne considérant que la contrainte environnementale portant sur l'amplitude du réchauffement (+2 °C maximum par rapport au niveau de 1990), on trouve respectivement, pour une sensibilité de 2,5 °C ; 3,5 °C et 4,5 °C, les concentrations plafonds suivantes : 591 ppm, 494 ppm et 442 ppm. L'introduction d'une incertitude sur la sensibilité du climat induit donc pour une contrainte sur l'amplitude du réchauffement de 2 °C (depuis 1990) des contraintes en concentration plus fortes mais néanmoins encore comparables. De manière plus générale, on a représenté Figure IV-12 les correspondances entre seuils de réchauffement et plafonds de concentration : en raison de l'incertitude sur la sensibilité du climat, pour un seuil de réchauffement donné, on peut passer d'un plafond très contraignant quand la sensibilité du climat prend une valeur haute à un plafond peu contraignant quand elle prend en revanche une valeur basse.

La Figure IV-13 confirme qu'à une sensibilité à laquelle correspond une contrainte forte sur les plafonds de concentrations répond un niveau d'abattement fort. En 2000, le niveau d'abattement atteint 1%, 7% et 14% pour des sensibilités respectivement de 2,5 °C, 3,5 °C et 4,5 °C. En 2100, ces efforts représentent des réductions des émissions de référence de 22%, 67% et 78%. L'incertitude sur la sensibilité du climat se répercute donc de manière très importante sur la réponse optimale : pour les deux valeurs extrêmes explorées ici, elle varie de plus d'un facteur dix jusqu'en 2070.

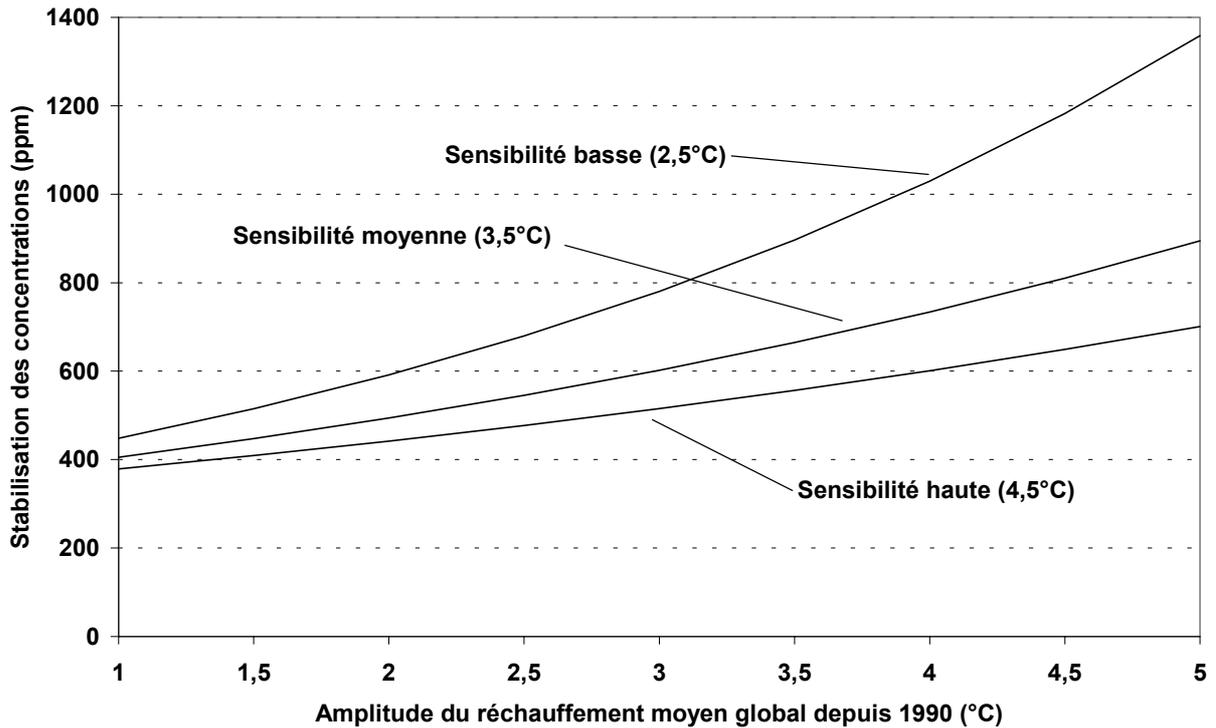


Figure IV-12. Correspondance entre seuils de réchauffement et plafonds de concentration en présence d'incertitude sur la sensibilité du climat.

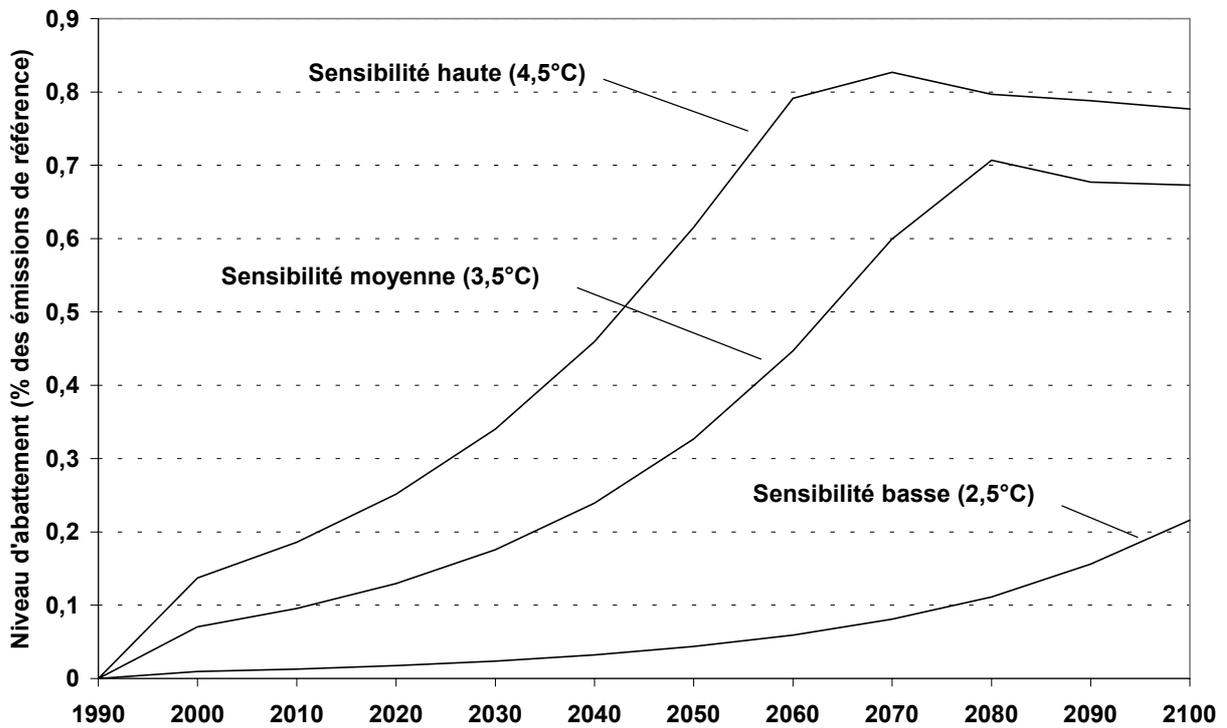


Figure IV-13. Sensibilité de la trajectoire optimale d'abattement à la valeur de la sensibilité du climat (niveau critique de changement climatique, $\Delta\theta_{MAX}$: +2 °C ; rythme critique, Δ_{RYT} : 0,3 °C.décennie⁻¹).

Dans un deuxième temps, nous avons examiné l'influence croisée de la sensibilité du climat et du taux d'actualisation (le plus important paramètre socio-économique d'après notre étude précédente) sur la réponse optimale du modèle en univers certain. Les résultats sont présentés Figure IV-14. En premier lieu, il apparaît que le taux d'actualisation influence beaucoup la réponse aux premières dates : le niveau d'abattement à court-terme devient plus faible quand le taux d'actualisation croît et cette différenciation s'accroît avec la valeur de la sensibilité du climat. En outre, l'influence de la sensibilité du climat sur la réponse optimale domine celle du taux d'actualisation à long terme : vers la fin du XXIème siècle, les niveaux d'abattement convergent pour une valeur donnée de la sensibilité et ce d'autant plus que la sensibilité croît. En d'autres termes, le taux d'actualisation dicte le profil (surtout à court-terme) de la réponse optimale tandis que la sensibilité du climat en définit l'échelle (surtout le niveau de la réponse optimale à long terme). Rappelons que le taux d'actualisation influence la répartition temporelle du budget carbone tandis que la sensibilité du climat en définit le volume.

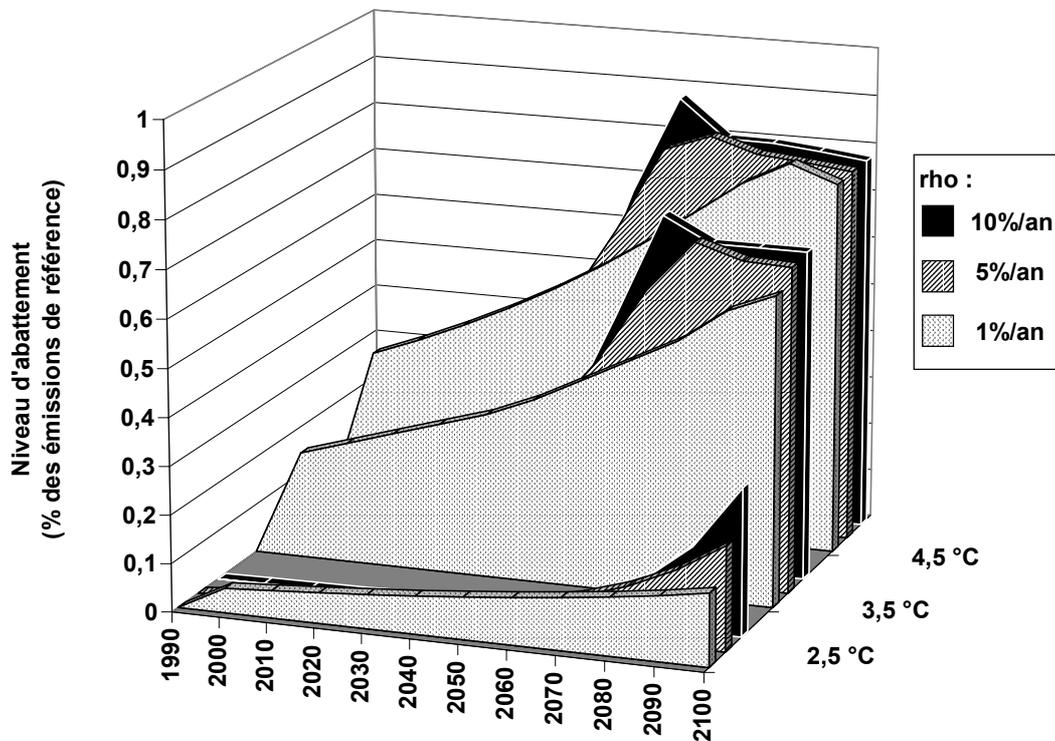


Figure IV-14. Influence croisée de la sensibilité climatique et du taux d'actualisation sur la trajectoire optimale d'abattement (niveau critique de changement climatique, $\Delta\theta_{MAX} : +2 \text{ }^\circ\text{C}$; rythme critique, $\Delta_{RYT} : 0,3 \text{ }^\circ\text{C.décennie}^{-1}$).

III.5. Réponse optimale du modèle et influence des contraintes environnementales

A côté des paramètres du modèle, il est intéressant d'étudier l'impact sur la réponse optimale du modèle du seuil et du rythme critiques de réchauffement (fixés dans le cas respectivement à $+2\text{ }^{\circ}\text{C}$ et $0,3\text{ }^{\circ}\text{C.décennie}$). En formulant de telles contraintes, on définit un espace à l'intérieur duquel les impacts du changement climatique et leur traduction en dommages sont considérés comme socialement acceptables, soit que des seuils objectifs de danger (comme l'extinction de la circulation thermohaline dans l'Atlantique nord ou, à une échelle régionale, une perturbation de la mousson sur le sous-continent indien) soient clairement identifiés - approche tournée vers les risques, soit que les coûts d'une prévention plus importante soient jugés par trop supérieurs au bénéfice collectif retiré - approche tournée vers les coûts. Nous avons vu au Chapitre I de cette thèse que le choix d'un tel cadre d'analyse pour évaluer les politiques climatiques relevait de deux motivations : d'une part, un refus catégorique de l'évaluation économique des impacts pour des impératifs moraux ou le souhait de ne pas recourir à l'analyse coût-bénéfice compte tenu de la cascade d'incertitudes en présence et des difficultés de traiter des enjeux distributifs, du long-terme et de potentielles irréversibilités ; d'autre part, le choix d'une mesure des bénéfices des politiques climatiques plus proche des mécanismes porteurs des dommages que ne le sont les plafonds de concentrations. Toute la difficulté est bien sûr de trouver un accord sur la valeur de telles contraintes globales.

Dans son troisième rapport ([*McCarthy et al.*, 2001], chap. XIX), le GIEC suit une approche qualitative pour appréhender les risques climatiques, en reliant variation de la température moyenne globale depuis 1990 à différentes préoccupations en termes d'impacts du changement climatique (voir *infra*, Chap. I). A une hausse de $+2\text{ }^{\circ}\text{C}$, correspond déjà un niveau d'impacts agrégés non négligeables, qui sont majoritairement supportés par les zones vulnérables. A titre de comparaison, l'étude d'impact de Mendelsohn [*Mendelsohn et al.*, 1997] donne en 2060 pour un réchauffement de $+2\text{ }^{\circ}\text{C}$ (température moyenne globale annuelle) des impacts agrégés peu importants (pertes de 0,3 % du PIB mondial) mais qui sont très significatifs pour certaines zones (perte de 4,7% du PIB régional en Afrique et de 1,9% en Océanie, 1,3% en Amérique latine). On retrouve un tel chiffre par exemple dans le *Global Fast Track Assessment* [*Parry et al.*, 2001] (une évaluation intégrée à l'échelle globale des conséquences du changement climatique sur la sécurité alimentaire, l'abondance de l'eau, le risque d'inondation des zones côtières et l'expansion de la malaria) où les risques de pénurie d'eau s'accroissent significativement autour d'un seuil de $+2\text{ }^{\circ}\text{C}$, ou avec les résultats de [*Simonett*, 1989], qui suggèrent qu'un réchauffement de cette ampleur aurait des conséquences dramatiques sur la culture du café en Ouganda. Cette contrainte de $+2\text{ }^{\circ}\text{C}$ est également souvent utilisée dans les approches inverses, nous l'avons vu, et elle y est en fait beaucoup plus stricte puisqu'elle porte sur l'amplitude du réchauffement moyen global *depuis la période préindustrielle*.

Beaucoup moins d'informations sont disponibles sur le lien entre rythme du réchauffement et impacts du changement climatique. Les risques les plus clairement identifiés concernent les écosystèmes (voir par exemple, [*WWF*, 2000]). A partir d'études sur la capacité des arbres à migrer ou à s'adapter en réponse aux variations du climat (reconstitutions paléobotaniques pour les interglaciaires du quaternaire et observations pour la période contemporaine), [*Krause et al.*, 1989] ont préconisé comme rythme maximum une variation de $0,1\text{ }^{\circ}\text{C}$ par décennie : au-delà, la composition spécifique et les fonctions des écosystèmes seraient menacées. Ce seuil a été repris dans les recommandations émises par la Commission d'enquête auprès du Bundestag

« Preventive measures to protect the Earth's atmosphere » et le conseil sur la Nature et l'Environnement aux Pays-Bas (voir [Eyre et al., 1999], Annexe 3, p. 14). C'est une contrainte, on le verra, très stricte surtout quand on la compare à l'estimation du rythme du réchauffement citée dans le dernier rapport du GIEC : *vraisemblablement* (probabilité entre 0,66 et 0,9) entre +0,1 et +0,2 °C par décennie pour les prochaines années ([Houghton et al., 2001], SPM, p. 13).

Finalement, l'analyse de sensibilité à été conduite à partir de l'ensemble de valeurs suivantes $\Delta\theta_{MAX} = +1\text{ °C}$, $+2\text{ °C}$, $+3\text{ °C}$ pour l'amplitude du réchauffement et $\Delta_{RYT} = 0,1\text{ °C.décennie}^{-1}$ et $0,2\text{ °C.décennie}^{-1}$ et $0,3\text{ °C.décennie}^{-1}$ et $0,4\text{ °C.décennie}^{-1}$, pour le niveau maximum de rythme tolérable.

III.5.1. Impact du seuil de réchauffement sur la décision optimale

A. Entre plafond de concentration et seuil de réchauffement : une inertie naturelle supplémentaire, celle de l'océan.

On a vu précédemment qu'il existe des équivalences entre plafonds de concentration et seuils de réchauffement. Par exemple, si la sensibilité du climat vaut $+3,5\text{ °C}$, et que l'on cherche à ne pas dépasser un seuil de réchauffement de $+2\text{ °C}$ (par rapport à 1990), alors le plafond correspondant vaut 494 ppm ; de même, si l'on cherche à respecter un plafond de 441 ppm, et que la sensibilité du climat vaut $+4,5\text{ °C}$, alors le seuil de réchauffement correspondant est $+2\text{ °C}$. Si l'on atteint dans les deux cas le même niveau de protection de l'atmosphère et du climat, a-t-on suivi dans les deux cas les mêmes trajectoires d'abattement, alors que les inerties naturelles sont différentes ?

C'est ce qui est représenté Figure IV-15à17 où l'on cherche à stabiliser la concentration atmosphérique de CO₂ à 441 ppm, soit démarche *a priori* équivalente, à ne pas dépasser un seuil de réchauffement fixé à $+2\text{ °C}$ (la sensibilité du climat valant $+4,5\text{ °C}$). Notons avant de commenter ces résultats qu'il s'agit dans les deux cas d'une contrainte assez lourde.

Pour la politique de stabilisation des concentrations, la contrainte est respectée grâce à des efforts soutenus (on est à des taux d'abattement de plus de 50% en 2030 et à 70% en 2050, voir Figure IV-17) et on atteint dès 2050 les 441 ppm (Figure IV-16). Une fois que la concentration est stabilisée, compte tenu essentiellement de l'inertie thermique de l'océan qui s'équilibre progressivement avec une atmosphère au bilan radiatif perturbé dans le sens du réchauffement, la température moyenne globale continue de s'élever (voir Figure IV-15), à un rythme moins soutenu, de $+1,46\text{ °C}$ en 2050 à $+1,97\text{ °C}$ en 2240 (la température ensuite commence à redescendre car la concentration atmosphérique de CO₂ diminue du fait de l'activité des puits océaniques et biosphériques). Cette différence, entre température au moment de la stabilisation des concentrations et température à l'équilibre thermique, est appelée *Global Warming Commitment* et traduit l'importance des inerties de la machine climatique en réponse à un forçage déterminé.

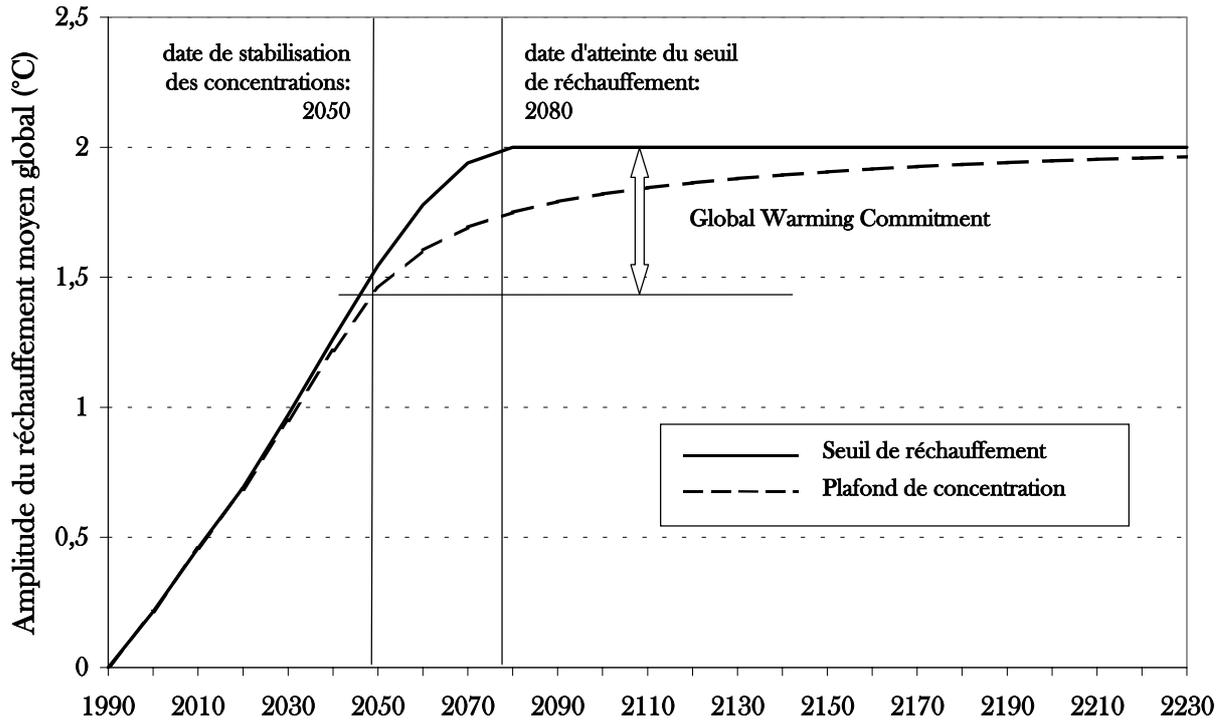


Figure IV-15. Comparaison des trajectoires optimales de *réchauffement* pour deux politiques climatiques visant un même objectif de protection à long-terme de l'atmosphère et du climat.

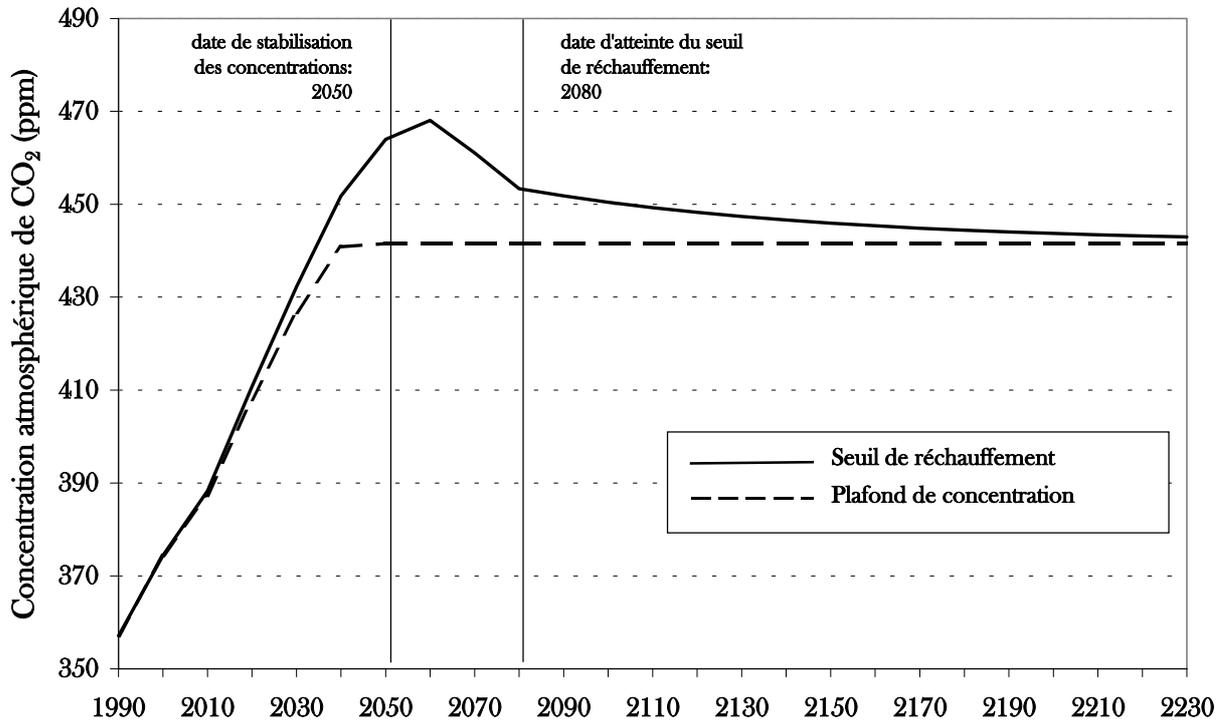


Figure IV-16. Comparaison des trajectoires optimales en *concentration* pour deux politiques climatiques visant un même objectif de protection à long-terme de l'atmosphère et du climat.

Pour la politique de contrôle de l'amplitude du réchauffement, le seuil de réchauffement est atteint dès 2080, à un rythme donc beaucoup plus rapide que pour l'autre politique (Figure IV-15). On peut constater que l'on dépasse le plafond de stabilisation des concentrations (de presque 30 ppm) pour y retourner très lentement (Figure IV-16). En fait, en cherchant à ne pas dépasser un seuil donné de réchauffement, on peut exploiter l'inertie thermique de l'océan donc le freinage en concentration peut être plus tardif et moins intense que précédemment. C'est d'ailleurs ce que l'on observe sur les niveaux d'abattement (Figure IV-17). Pour des plafonds de stabilisation, les efforts d'abattement sont croissants car l'absorption naturelle des puits de carbone ne suffit pas à réguler à temps cette injection massive de carbone. Pour le seuil de réchauffement en revanche, on bénéficie du « puits thermique » de l'océan (et de l'activité des puits de carbone), les efforts de réduction des émissions sont donc plus progressifs (ils doivent ensuite être supérieurs pour « rattraper » les émissions excédentaires pendant le XXI^{ème} siècle).

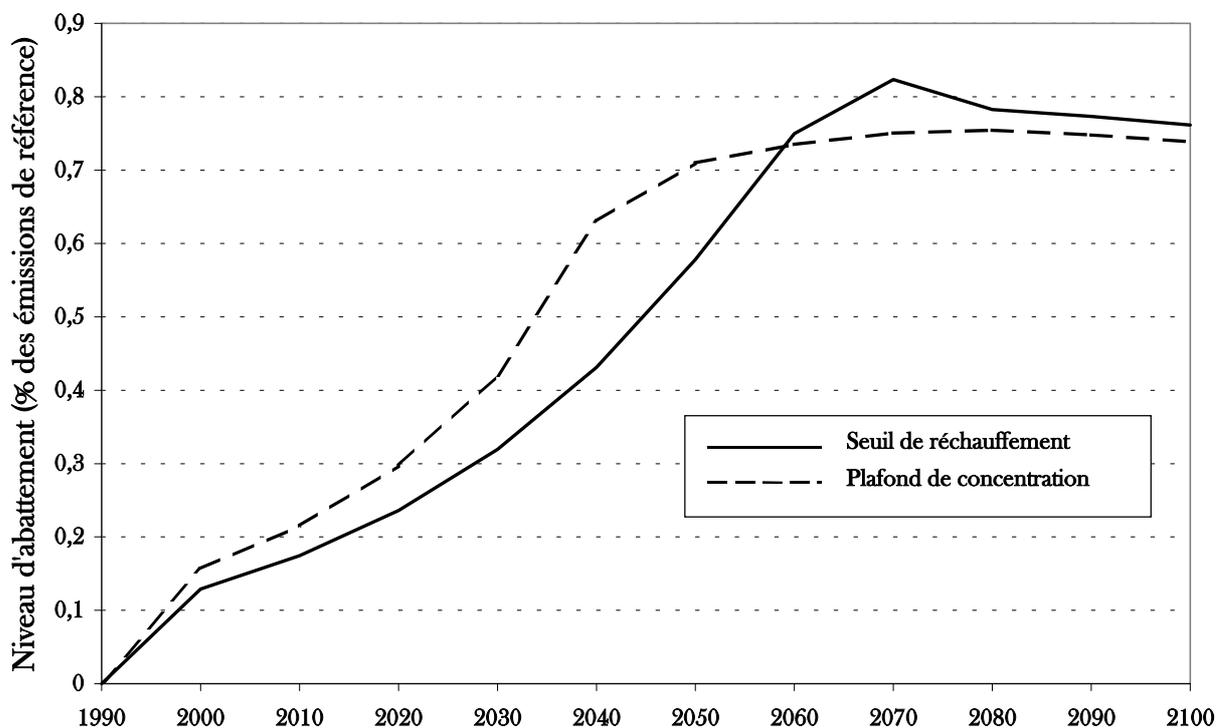


Figure IV-17. Comparaison des trajectoires optimales *d'abattement* pour deux politiques climatiques visant un même objectif de protection à long-terme de l'atmosphère et du climat.

En trait plein, une politique coût-efficacité avec seuil de réchauffement ($+2\text{ }^{\circ}\text{C}$, $\theta_{\infty} = +4,5\text{ }^{\circ}\text{C}$) et en pointillé, une politique de stabilisation des concentrations (plafond = 441ppm).

En conclusion, le passage plafond de concentration/seuil de réchauffement, quand on reste dans un contexte équivalent (c'est à dire pour un même objectif de protection du climat à long-terme) et en un univers certain, autorise à repousser quelque peu les efforts compte tenu de l'inertie de la machine climatique que l'on doit maintenant prendre en considération.

B. Seuil de réchauffement et réponse optimale du modèle

Nous avons entrepris une analyse de sensibilité sur la contrainte d'amplitude de réchauffement dont les résultats sont présentés à la Figure IV-18.

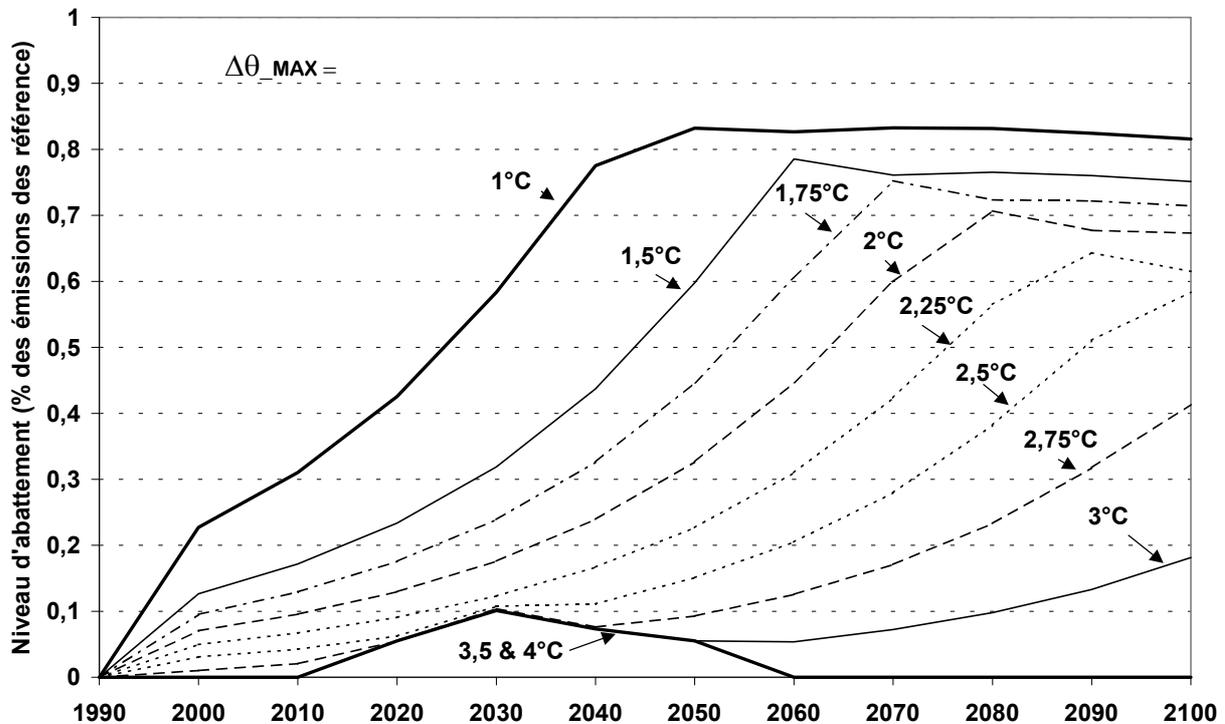


Figure IV-18. Influence de la contrainte relative à l'amplitude du réchauffement sur la trajectoire optimale d'abattement (rythme critique, $\Delta_{RTT} : 0,3 \text{ } ^\circ\text{C.décennie}^{-1}$).

On retrouve des courbes qui rappellent par leurs allures celles qui sont présentées à la Figure IV-13 : dans les deux cas, on vise toute une gamme de plafonds de stabilisation des concentrations, soit que l'objectif de protection globale du climat est le même et que la sensibilité du climat peut avoir plusieurs valeurs (Figure IV-13), soit que l'on cherche à ne pas franchir - pour une même sensibilité du climat - des seuils de réchauffement différents (Figure IV-18). Ont été testés toute une gamme de seuils, allant de $+1 \text{ } ^\circ\text{C}$ à $+4 \text{ } ^\circ\text{C}$, auxquelles correspond la gamme de plafonds de concentration suivante : 405 ppm à 734ppm. On peut constater sur la figure que logiquement, plus on relâche cette contrainte, moins les efforts d'abattement ont besoin d'être intenses et précoces. Surtout, on peut constater que pour des seuils de valeur supérieure ou égale à $+2,5 \text{ } ^\circ\text{C}$, la réponse optimale du modèle présente un pic centré sur 2030 qui devient de plus en plus manifeste alors qu'on continue à relâcher la contrainte sur l'amplitude du réchauffement et que les efforts à long-terme sont décroissants. C'est à dire que la contrainte de rythme devient dans ce cas-là plus importante que la contrainte d'amplitude : alors que l'objectif de protection globale du climat à long-terme devient de moins en moins contraignant et devrait conduire à de moins en moins d'efforts, la contrainte dynamique sur l'évolution du climat s'exprime et conduit à entreprendre des efforts à court-terme. On peut vérifier (résultats non présentés ici) que quand on relâche cette contrainte, les trajectoires d'abattement se différencient bien et conduisent à de moins en moins d'efforts plus la contrainte de long-terme est relâchée.

III.6. Influence croisée des deux contraintes climatique sur la décision optimale

Il est donc nécessaire d'étudier l'influence croisée de ces deux contraintes. Pour ce faire, étudions d'abord les trajectoires climatiques de référence de notre modèle pour différentes valeurs de la sensibilité du climat pour comprendre à quel moment les contraintes peuvent s'exprimer et comment leur influence respective se varie selon leurs valeurs (voir Figure IV-19).

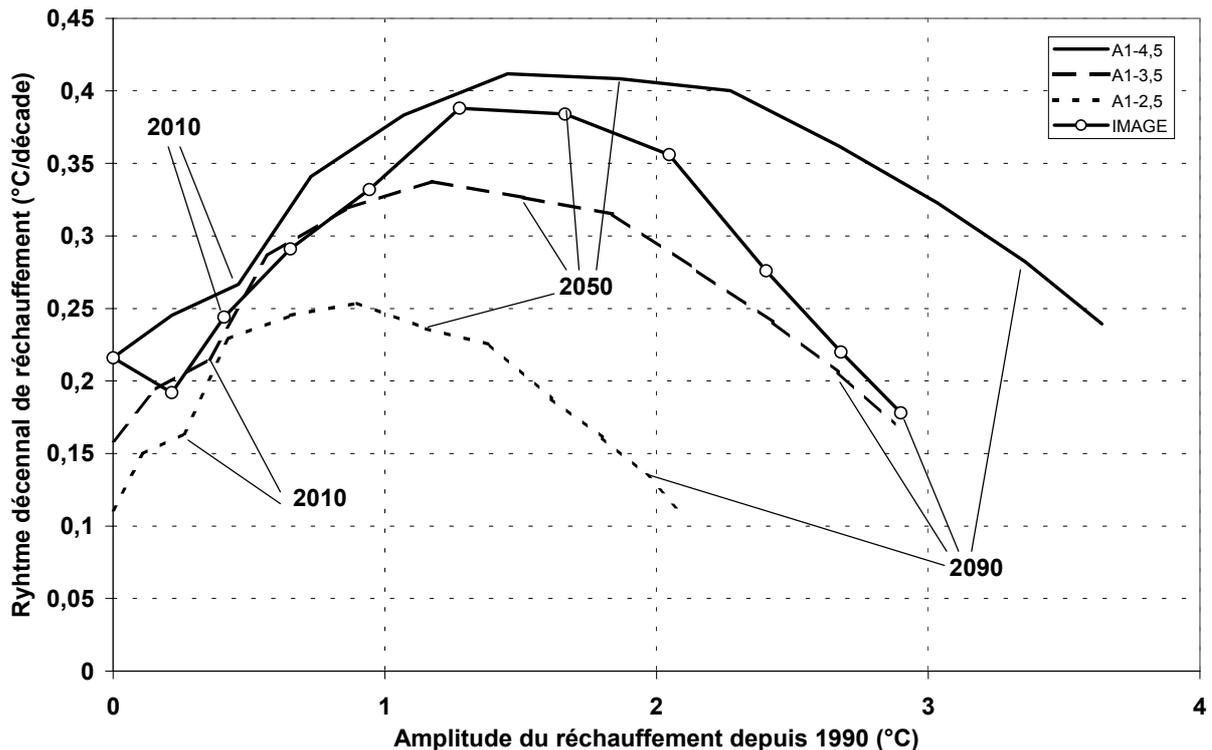


Figure IV-19. Diagramme de phase Amplitude du réchauffement (depuis 1990)/Rythme décennal du réchauffement pour le scénario A1 : *RESPONSE*, trois valeurs pour la sensibilité du climat, et modèle *IMAGE*.

Le diagramme se lit comme suit : comme la température moyenne globale est toujours croissante, on se déplace chronologiquement sur chaque courbe de gauche à droite ; certaines dates (2010, 2050, 2090) ont été indiquées pour faciliter la lecture. L'à-coup s'explique par la forte accélération des émissions dans le scénario de référence dès 2000. En fait, l'augmentation de température est reliée à l'amplitude et à la durée du forçage, c'est à dire au stock atmosphérique de CO₂. Ce stock étant toujours croissant (au moins jusqu'en 2150), la température continue de croître. Son rythme d'augmentation (lecture sur l'axe des ordonnées), en revanche, dépend de l'augmentation du forçage entre chaque période, qui est directement reliée à l'incrément du stock atmosphérique de CO₂, c'est à dire au cycle du carbone près, à la chronique des émissions. On retrouve d'ailleurs dans la Figure IV-19, les profils temporels des émissions du scénario de référence (croissance puis décroissance ; pic en 2050 avec un décalage de 10 ans lié à la modélisation du cycle du carbone) ; l'amplitude des courbes dépendant, elle, des valeurs de la sensibilité du climat.

On peut constater que si la température moyenne globale continue de s'élever au delà de 2100, cette évolution se produit à un rythme beaucoup moins important qu'au milieu du siècle. C'est pendant cette période donc, que la contrainte de rythme s'exprime avec le plus d'intensité, d'autant plus qu'elle est resserrée et que la sensibilité du climat prend une valeur élevée. Pour écrêter cette accélération, les efforts d'abattement doivent donc être renforcés dans la première moitié du XXIème siècle. Pour respecter la contrainte de long-terme, on l'a vu précédemment, les efforts peuvent être plus progressifs.

Pour confirmer ces intuitions, nous avons examiné l'influence croisée des deux contraintes pour les ensembles de valeurs suivantes : $\Delta\theta_{MAX} = +1\text{ }^{\circ}\text{C}$, $+2\text{ }^{\circ}\text{C}$, $+3\text{ }^{\circ}\text{C}$ pour l'amplitude du réchauffement et $\Delta_{RYT} = 0,1\text{ }^{\circ}\text{C.décennie}^{-1}$ et $0,2\text{ }^{\circ}\text{C.décennie}^{-1}$ et $0,3\text{ }^{\circ}\text{C.décennie}^{-1}$ et $0,4\text{ }^{\circ}\text{C.décennie}^{-1}$, pour le niveau maximum de rythme tolérable. Les résultats sont présentés Figure IV-20.

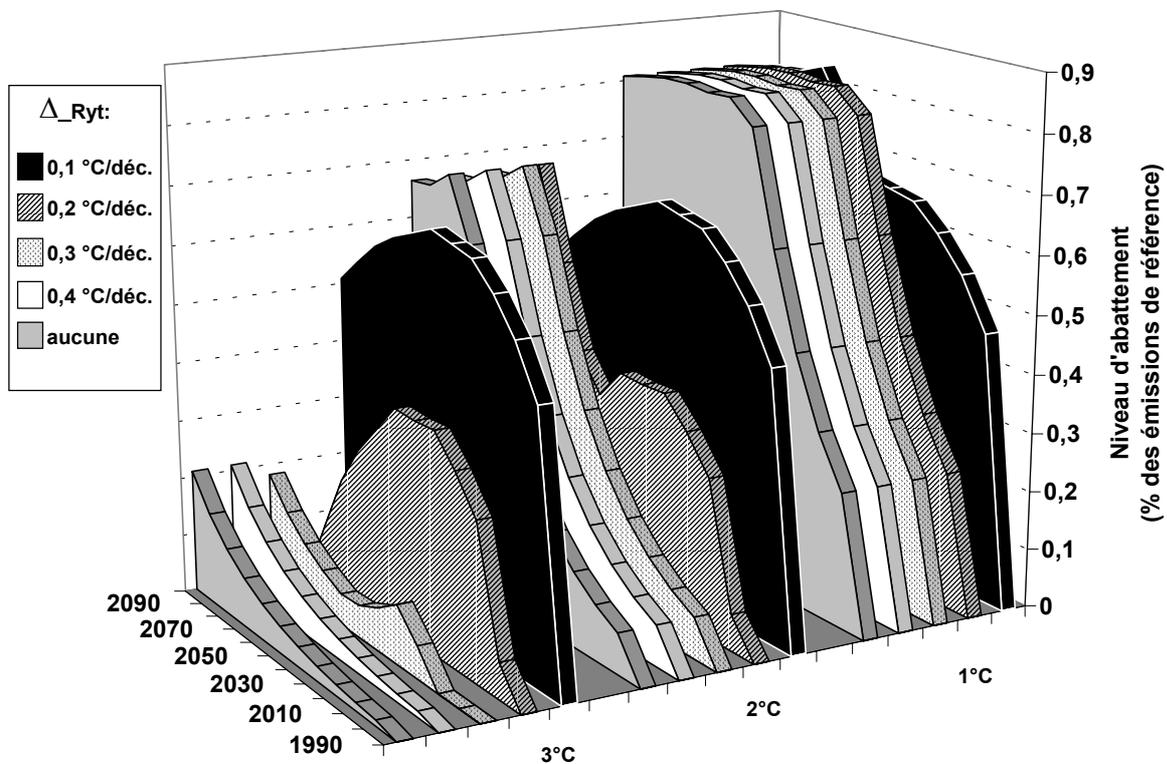


Figure IV-20. Influence croisée des contraintes climatiques sur la réponse optimale du modèle.

On peut constater qu'on retrouve bien que la contrainte sur l'amplitude de réchauffement domine de manière générale la contrainte sur le rythme du réchauffement pour le niveau de la réponse de long-terme : à la fin du siècle, les niveaux d'abattement convergent vers une valeur identique pour chaque contrainte ; ces valeurs sont bien décroissantes quand on relâche la contrainte sur l'amplitude du réchauffement. La contrainte sur le rythme dicte de manière générale l'ampleur de la réponse à court-terme : plus elle est resserrée, plus on doit fournir d'efforts à court-terme (c'est particulièrement net quand cette contrainte prend la valeur $0,1$ ou $0,2\text{ }^{\circ}\text{C.décennie}^{-1}$).

Comment se classent ces deux contraintes ? On peut constater que la contrainte sur le rythme du réchauffement domine systématiquement la contrainte sur l'amplitude du réchauffement à

long-terme quand elle vaut $0,1 \text{ }^{\circ}\text{C.décennie}^{-1}$. Compte tenu du diagramme présenté Figure IV-19, ce n'est pas une surprise : le rythme du réchauffement dans le scénario de référence (avec une sensibilité de $+3,5 \text{ }^{\circ}\text{C}$) est systématiquement supérieur à cette valeur¹⁹. Elle est en fait saturée dès cette date jusqu'en 2070 (quand la contrainte sur l'amplitude du réchauffement vaut $+1 \text{ }^{\circ}\text{C}$) et bien au-delà dans les autres cas. Sauf dans le cas où la contrainte sur l'amplitude du réchauffement vaut $+1 \text{ }^{\circ}\text{C}$ (et dans ce cas, il faut poursuivre les efforts), respecter une contrainte de rythme aussi sévère suffit à respecter la contrainte sur l'amplitude du réchauffement à long-terme (les efforts d'abattement décroissent par la suite).

Pour des valeurs supérieures de la contrainte de rythme, c'est la contrainte sur l'amplitude du réchauffement à long-terme qui s'exprime (c'est très net pour la valeur $1 \text{ }^{\circ}\text{C}$ ou quand la contrainte sur le rythme est supérieure ou égale à $0,3 \text{ }^{\circ}\text{C.décennie}^{-1}$) avec une codominance pour la valeur $0,2 \text{ }^{\circ}\text{C.décennie}^{-1}$ et les contraintes sur l'amplitude 2 et $3 \text{ }^{\circ}\text{C}$ (respecter la contrainte de rythme autorise d'ailleurs dans ces deux cas à relâcher un petit peu les efforts, d'à peu près 20 ans).

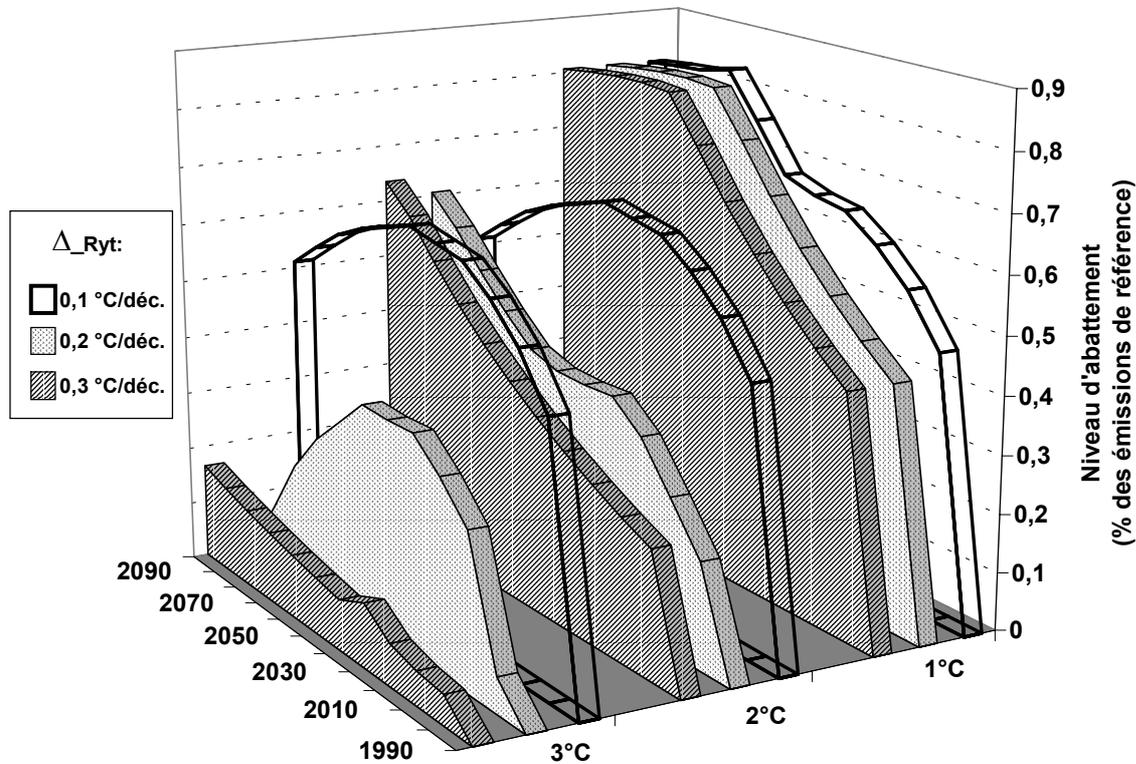


Figure IV-21. Influence croisée des contraintes climatiques sur la réponse optimale du modèle, taux d'actualisation à $1\%.\text{an}^{-1}$.

Pour terminer cette analyse de sensibilité, on peut étudier comment les conclusions précédentes évoluent pour d'autres valeurs du taux d'actualisation. On a vu précédemment que c'était le paramètre socio-économique le plus important pour la réponse optimale du modèle, puisque selon sa valeur, l'effort de réduction des émissions est réparti de manière progressive

¹⁹ On doit d'ailleurs noter que cette contrainte ne peut pas être systématiquement respectée à toutes les dates : comme on n'entreprend pas d'effort en 1990, l'évolution du climat est prescrite jusqu'en 2010, en particulier le rythme qui est prescrit pour les deux premières décennies. Les efforts entrepris dès 2000 portent leurs fruits dès 2020 et le rythme du changement climatique entre 2010 et 2020 peut alors respecter cette contrainte.

(valeur faible) ou repoussé de quelques décennies (valeur élevée). Les conclusions précédentes restent valides que le taux d'actualisation prenne une valeur proche de 10%.an-1 ou de 1%.an-1. Nous ne présentons les résultats que pour le second cas de figure (voir Figure IV-21) : on peut constater que lorsque le taux d'actualisation est particulièrement bas, les efforts sont davantage étalés dans le temps (comparer avec la Figure IV-20, où le taux d'actualisation est fixé à 5 %.an-1) mais l'influence respective des contraintes reste identique à la situation précédente.

De même, comment évoluent ces conclusions si la sensibilité du climat prend une autre valeur (en particulier plus élevée). En considérant une situation où la sensibilité du climat vaut +4,5 °C (résultats non présentés ici), on retrouve le même type de classement des contraintes entre importance relative à court-terme et à long-terme (elle est même encore plus prononcée sachant que le climat se réchauffe beaucoup plus et beaucoup plus vite pour une même trajectoire de concentrations).

Nous avons rassemblé dans le Tableau IV-2 ces résultats pour ce qui concerne l'abattement pendant la première moitié du XXI^{ème} siècle, sur lequel porte essentiellement notre étude.

$\Delta\theta_{MAX}$	1 °C	2 °C	3 °C
0,1 °C.décennie ⁻¹	>	>	>
0,2 °C.décennie ⁻¹	<	>	>
0,3 °C.décennie ⁻¹	<	<	>
0,4 °C.décennie ⁻¹	<	<	<

Tableau IV-2. Influence croisée des contraintes climatiques sur les niveaux d'abattement pendant la première moitié du XXI^{ème} siècle.

Le tableau se lit en ligne comme suit : « > » signifie la contrainte relative au rythme du changement climatique domine la contrainte sur l'amplitude du réchauffement à long-terme pour la réponse de court-terme (jusqu'en 2050) et « < », l'inverse.

L'analyse de sensibilité du modèle *RESPONSE_Θ* nous a permis d'explorer, en univers certain, ses différents mécanismes et d'isoler les paramètres qui exercent une plus grande influence sur la trajectoire optimale d'efforts de réduction des émissions : deux sont de nature socio-économique (le taux d'actualisation et le degré d'inertie socio-économique, le premier dominant l'influence du second), le troisième concerne la dynamique des systèmes naturels (la sensibilité du climat). Nous avons également pu examiner comment les contraintes climatiques, sur l'amplitude du réchauffement et son rythme, façonnent la réponse optimale du modèle, retrouvant en cela les résultats des approches *Tolerable Windows Approach* et *Safe landing Analysis* (voir *supra*): contrôler le rythme du changement climatique impose une contrainte importante sur les émissions pendant la première moitié du XXI^{ème} siècle, en particulier quand cette contrainte vaut 0,1 ou 0,2 °C.décennie⁻¹.

Mais tous ces paramètres sont incertains et controversés : le taux d'actualisation dépend des perspectives de croissance future, de spécificités liées à la fonction d'utilité et de considérations regardant l'équité inter-générationnelle ; si dans l'ensemble les différentes inerties socio-économiques sont assez bien caractérisées, c'est la manière dont elles s'exprimeront en réponse à une politique donnée qui est beaucoup plus incertaine ; nous avons déjà présenté l'incertitude relative à la sensibilité du climat ; quant aux contraintes climatiques, c'est nous l'avons vu,

l'incertitude sur les impacts d'un scénario de changement climatique donné augmentée de l'incertitude et des divergences de vues sur leur caractère plus ou moins inacceptable. Or si l'analyse de sensibilité permet d'explorer les champs du possible (en particulier du côté des situations extrêmes), elle n'intègre pas de représentation de la décision sous incertitude (sauf si le critère est du type *pire des cas* ou *miniMax Regret*, c'est à dire des critères de décision dans l'incertain qui ne font pas appel à des distributions de probabilités sur l'occurrence des états du monde) : les différents états du monde ne sont pas pondérés par leur probabilité d'occurrence, chacun devenant tour à tour l'unique futur possible à l'exclusion des autres. Sur la base des résultats de l'analyse de sensibilité du modèle *RESPONSE_Θ*, quelle décision d'abatement est optimale à la période de Kyoto ou en 2020 quand on voit que compte tenu de l'incertitude sur la sensibilité du climat, les recommandations du modèle varient d'un facteur 14 pour les valeurs extrêmes considérées (Figure IV-13) ou qu'en raison de l'incertitude sur l'objectif global de protection à long-terme du climat, ces recommandations varient au moins d'un facteur 4 (Figure IV-18).

De même qu'elle n'articule pas processus de décision et croyances divergentes ou incertitudes, l'analyse de sensibilité ne prend pas en compte les phénomènes d'apprentissage, qui permettent d'ajuster, sur le temps long qu'embrassent les politiques climatiques, les efforts de réduction (ou les actions d'adaptation) selon un processus de décision séquentielle. Elle n'intègre donc pas de flexibilité et ne permet pas de hiérarchiser les incertitudes associées à chacun des temps de la décision. Deux limitations importantes que nous nous proposons de dépasser maintenant.

IV. Politiques climatiques de précaution : leçons du modèle RESPONSE_Θ

Nous allons évaluer l'impact des incertitudes concernant la sensibilité du climat et les objectifs des politiques climatiques sur la décision, en particulier les efforts d'abatement jusqu'en 2050 : quel est le coût d'une stratégie de précaution, où on cherche à satisfaire un objectif en présence d'incertitude, et quels regrets induit-elle ?, est-ce que tenir compte d'une amélioration possible des connaissances autorise plus de flexibilité pour les décisions de court-terme ? quelles sont les incertitudes cruciales, entre sensibilité du climat, amplitude et rythme critique de réchauffement, pour cette période et comment se hiérarchisent-elles ?

IV.1. Politique climatique de précaution en présence d'incertitude sur la sensibilité du climat

Pour représenter une situation de recherche de politique climatique optimale en présence d'incertitude sur la sensibilité du climat avec arrivée d'information sur ce paramètre, nous avons reformulé le modèle *RESPONSE_Θ* (voir Encadré IV-2).

Nous considérons trois états du monde (s), caractérisés par la valeur que peut prendre la sensibilité du climat, $\{+2,5 \text{ }^\circ\text{C}; +3,5 \text{ }^\circ\text{C}; +4,5 \text{ }^\circ\text{C}\}$. A ces trois états du monde sont associées les probabilités subjectives *ex ante* suivantes (p_s) $\{0, 167; 0, 666; 0, 167\}$. De nouvelles connaissances, permettant de déterminer avec certitude cette valeur, sont disponibles à la date t_{info} . Nous ne représentons pas explicitement les mécanismes d'apprentissage, en particulier les

liens de dépendance entre faculté d'apprentissage et actions (*dependent learning*) ; l'apprentissage est donc ici exogène. A quelle date pourrions-nous réduire de manière significative l'incertitude sur la sensibilité du climat ? Au chapitre III, nous avons vu qu'il existe un large consensus sur le fait que des progrès majeurs des connaissances scientifiques sur ce point prendraient une cinquantaine d'années : ils dépendent de l'amélioration de notre compréhension des mécanismes du climat (sa variabilité interne, sa réponse à une perturbation), de la manière dont nous les modélisons, de notre connaissance des différents forçages (les volumes de GES émis) et bien sûr de l'évolution (observable) du climat (cruciale dans les questions de détection et d'attribution). Plutôt que de choisir une option optimiste ou pessimiste pour ce qui concerne la date d'arrivée d'information sur la sensibilité du climat, nous ne retenons pas de date particulière et nous explorons l'influence de la date d'arrivée d'information sur la décision optimale des décennies à venir : l'information peut être disponible au début de chaque décennie du siècle et nous incluons deux cas polaires, information parfaite ($t_{info} = 1990$) et incertitude complète ($t_{info} = 2300$, l'horizon du modèle).

Le planificateur central recherche la trajectoire optimale d'abattelements sachant que l'incertitude sur la sensibilité du climat sera levée à la date t_{info} : après cette date, il peut adapter la politique climatique selon l'information qu'il a obtenue (comme nous envisageons ici trois états du monde, il y a trois profils d'abattelements différents) ; avant cette date, il doit choisir une seule décision compte tenu de ses croyances sur la probabilité d'occurrence des états du monde, de la date d'arrivée d'information et des objectifs des politiques climatiques. Avec cette formulation, on envisage bien les différents états du monde et leur pondération subjective et surtout les différents *regrets* qui pourraient advenir une fois que la sensibilité du climat est connue : *regret économique*, on a trop investi, et trop vite, dans les mesures de réduction des émissions alors que la sensibilité du climat prend en fait une valeur basse et que ne pas franchir le seuil de réchauffement envisagé ne nécessitait pas autant d'actions à court-terme ; *regret environnemental*, faute d'une action suffisamment intense, on a perdu ou on menace de perdre certaines options de protection de l'atmosphère et du climat et - ce regret environnemental se double d'un regret économique du fait de l'existence d'inerties socio-économiques - vouloir les conserver induit des coûts très importants et rassemblés dans le temps en raison des efforts d'abattement à marche forcée qu'il faut entreprendre.

A partir de ces spécifications pour ce qui concerne l'incertitude, l'arrivée d'information et le processus de décision, *RESPONSE_Θ* a été reformulé de la manière suivante, les formes fonctionnelles et les valeurs des paramètres précédemment présentées restant identiques. On cherche à résoudre un jeu de trois problèmes parallèles, chacun indicé par l'état du monde auquel il correspond (notamment, l'évolution de la température moyenne globale dépend - via le paramètre λ - de la valeur de la sensibilité du climat). Ces trois problèmes pondérés par leur probabilité subjective d'occurrence sont considérés par le planificateur central dans la fonction objectif. Avant l'arrivée d'information, on impose que le niveau d'abattement soit identique quel que soit l'état du monde (contrainte non anticipative) ; après l'arrivée d'information, ces niveaux peuvent se différencier selon les contraintes propres à chaque état du monde.

Encadré IV-2. Politiques climatiques de précaution en présence d'incertitude sur la sensibilité du climat : évaluation à l'aide du modèle coût-efficacité RESPONSE_Θ.

Le code du modèle est disponible en annexe.

Fonction objectif : minimisation de l'espérance sur les trois états du monde de la somme actualisée des coûts d'abatement

$$\text{Min}_{Ab_t^s} \sum_s p_s \sum_{t=1990}^{2300} \frac{f(Ab_t^s, Ab_{t-1}^s, t)}{(1+\rho)^{(t-1990)}}$$

Contrainte sur l'amplitude du réchauffement moyen global

$$\forall t, (\theta_{At}^s(t) - \theta_{At}^s(1990)) \leq \Delta\theta_{MAX}$$

Contrainte de limitation du rythme décennal d'évolution de la température moyenne globale

$$\forall t, t \geq 2010, (\theta_{At}^s(t+10) - \theta_{At}^s(t)) \leq \Delta_{RYT}$$

Contrainte non anticipative

$$\forall t \leq t_{info}, \forall (s, s') \in S, Ab_t^s = Ab_t^{s'}$$

Emissions de référence de CO₂ (em_t)

données exogènes, tirées du scénario de référence (A1-m).

Cycle du carbone

$$\begin{pmatrix} A_{t+1}^s \\ B_{t+1}^s \\ O_{t+1}^s \end{pmatrix} = C_{trans} \cdot \begin{pmatrix} A_t^s \\ B_t^s \\ O_t^s \end{pmatrix} + \delta \cdot (1 - Ab_t^s) em_t \cdot \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}$$

Evolution de la température moyenne globale

$$\begin{cases} \theta_{At}^s(t+1) \\ \theta_{Oc}^s(t+1) \end{cases} = \begin{bmatrix} 1 - \sigma_1(\lambda_s + \sigma_2) & \sigma_1\sigma_2 \\ \sigma_3 & 1 - \sigma_3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \theta_{At}^s(t) \\ \theta_{Oc}^s(t) \end{bmatrix} + \sigma_1 \begin{bmatrix} F_{2X} \frac{\log\left(\frac{A_t^s}{A_{PI}}\right)}{\log 2} \\ 0 \end{bmatrix}$$

La prise en compte de l'incertitude sur la sensibilité du climat incite-telle à entreprendre davantage d'efforts d'abatement à court-terme ? Quelle est l'influence de la date d'arrivée d'information sur le niveau d'effort à court-terme ? Quels sont, pendant cette période, les paramètres les plus importants pour la décision ? Comment ces différents résultats sont-ils influencés par les croyances que l'on peut entretenir sur la valeur de la sensibilité du climat ? C'est ce que nous allons étudier maintenant.

IV.1.1. En présence d'incertitude sur la sensibilité du climat, une stratégie de précaution très contraignante à court-terme

Dans un premier temps, nous avons comparé deux situations :

- la première, où l'on cherche à ne pas dépasser un seuil de réchauffement de $+2\text{ }^{\circ}\text{C}$ et à maintenir le rythme décennal de l'évolution de la température moyenne globale en dessous de $+0,3\text{ }^{\circ}\text{C.décennie}^{-1}$ tout en considérant comme certain que la sensibilité du climat vaut $+3,5\text{ }^{\circ}\text{C}$;
- la seconde, où l'objectif des politiques climatiques est identique mais cette fois, on prend en compte toute l'incertitude sur ce paramètre (qui vaut $+3,5\text{ }^{\circ}\text{C}$ en espérance), en considérant éventuellement que des progrès en climatologie nous permettront d'apprendre sa valeur. Les résultats sont présentés Figure IV-22.

On peut constater que la prise en compte de l'incertitude sur la sensibilité du climat incite à entreprendre des efforts très importants : les recommandations du modèle *RESPONSE_Θ* pour une approche séquentielle sont très proches du pire des cas certains (sensibilité égale à $+4,5\text{ }^{\circ}\text{C}$) alors qu'en espérance la sensibilité du climat vaut $+3,5\text{ }^{\circ}\text{C}$. Par rapport à une situation où la sensibilité du climat vaut de manière certaine $+3,5\text{ }^{\circ}\text{C}$, quand l'information arrive en 2020, l'effort à fournir en 2010 représente une réduction de 12% des émissions de référence (au lieu de 9%) ; quand elle arrive en 2050, on passe à 16% (soit presque les 17% du pire des cas certains) ; dans une situation extrême enfin, où l'incertitude n'est jamais réduite, la trajectoire optimale sous incertitude complète est confondue avec la trajectoire optimale quand la sensibilité du climat $+4,5\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Entre agir maintenant ou attendre davantage d'informations, la balance penche donc dans le sens d'une action précoce. Quels facteurs permettent d'expliquer que l'on obtienne de telles recommandations ? S'agit-il du degré d'inertie socio-économique, qui, nous l'avons vu au chapitre précédent, peut inciter à entreprendre des efforts plus importants à court-terme pour éviter de faire face aux surcoûts d'une action à marche forcée en cas de mauvaise nouvelle du côté du climat ? S'agit-il des inerties naturelles, qui incitent à agir davantage pour respecter l'objectif de protection à long-terme du climat si la sensibilité du climat s'avérait prendre *in fine* une valeur élevée ? S'agit-il de la contrainte sur le rythme décennal du réchauffement, qui nous l'avons vu, est particulièrement prégnante jusqu'à la moitié du siècle ?

Pour évaluer l'influence du degré d'inertie socio-économique sur la stratégie optimale, nous avons entrepris une analyse de sensibilité où nous considérons une large gamme de temps de renouvellement des systèmes énergétiques, de 10 à 50 ans, ainsi qu'une situation idéale sans inertie. En même temps, nous avons croisé ces valeurs avec le taux d'actualisation, dont nous avons conclu, au terme de l'analyse de sensibilité à la section précédente, qu'il s'agit du paramètre socio-économique qui exerce la plus grande influence sur la réponse optimale du modèle en univers certain. Nous avons retenu quatre valeurs pour ce paramètre : 1, 3, 5 et 10 %.an⁻¹. Les résultats sont présentés Figure IV-23.

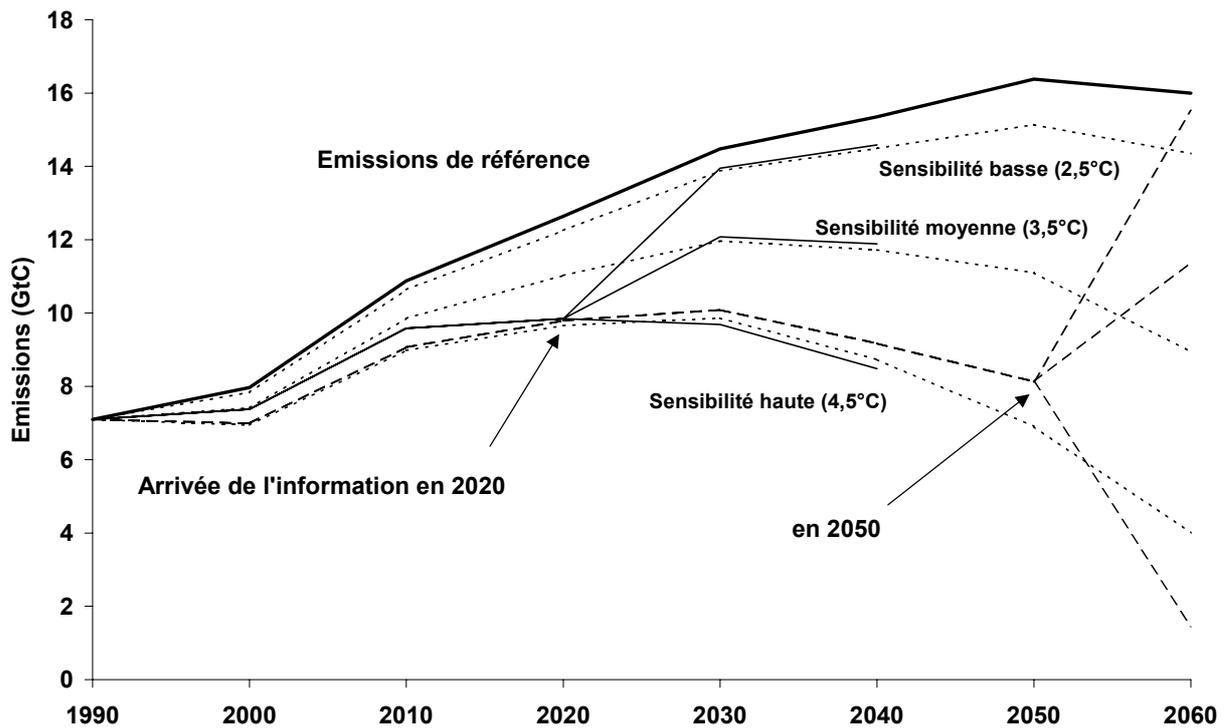


Figure IV-22. Politique climatique optimale en suivant une approche séquentielle en présence d'incertitude sur la sensibilité du climat.

Profils d'émissions compatibles avec une contrainte sur l'amplitude du réchauffement moyen global de +2 °C et sur son rythme décennal de +0,3 °C.décennie¹ : en information parfaite (courbes en pointillés, 3 valeur envisageables pour la sensibilité du climat) et en présence d'incertitude sur la sensibilité du climat avec apprentissage, en 2020 (courbes trait plein noir) ou 2050 (courbes tirets noirs). Avant l'arrivée d'information, on peut constater que les réductions d'émissions sont très importantes et sont presque confondues avec le pire des cas. Après l'arrivée d'information, les trajectoires peuvent s'ajuster ; il existe donc un regret économique important si l'on s'avère que la sensibilité du climat prend en fait une valeur basse.

Dans un premier temps, on retrouve bien les résultats de la section précédente : en univers certain, l'influence du taux d'actualisation domine largement l'influence du degré d'inertie socio-économique pour la réponse optimale. La réponse du modèle est très nettement différenciée selon les valeurs du taux d'actualisation (qui joue dans le sens d'un effet retard) et pas du tout selon le degré d'inertie socio-économique. En présence d'incertitude sur la sensibilité du climat et avec arrivée d'information, on remarque en premier lieu que la réponse optimale est dans tous les cas supérieure à la réponse optimale du modèle en univers certain. Surtout, on peut remarquer que si le degré d'inertie socio-économique à nouveau a bien peu d'influence sur la réponse optimale, l'impact du taux d'actualisation est lui beaucoup moins important que précédemment : il joue toujours dans le sens d'un effet retard (la réponse se classe dans un ordre décroissant pour des valeurs croissantes du taux d'actualisation) mais pour les valeurs 3, 5 et 10%, la réponse du modèle n'est presque plus différenciée et seule la valeur 1% se distingue.

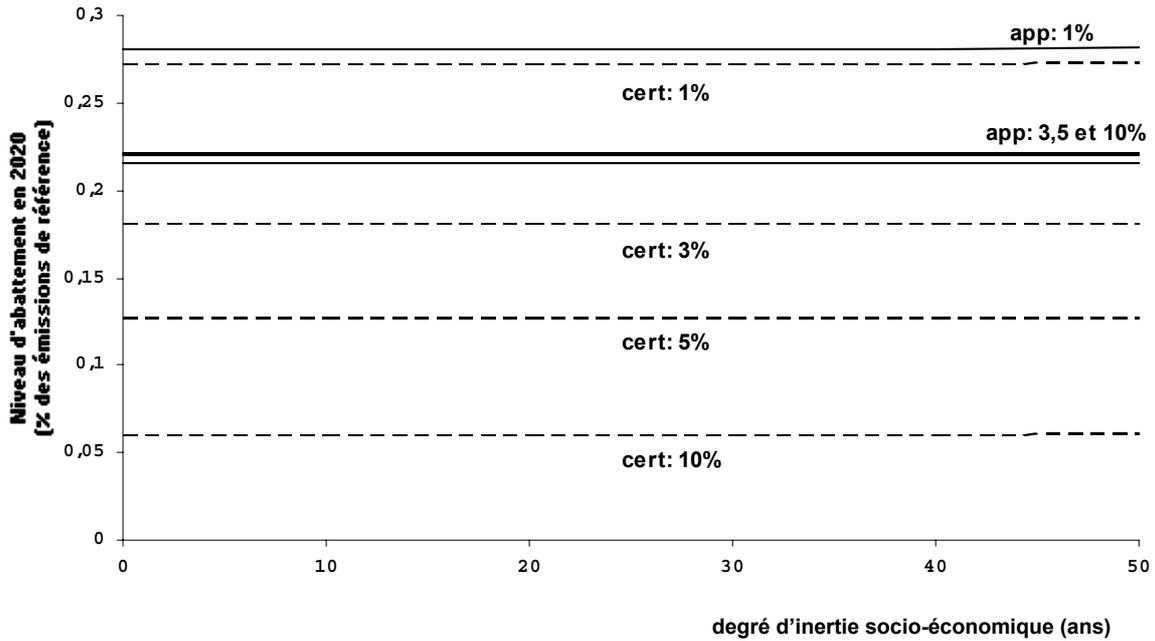


Figure IV-23. Influence relative du taux d'actualisation et du degré d'inertie socio-économique sur la décision optimale, en univers certain et en présence d'incertitude avec arrivée d'information.

Ces courbes représentent le niveau optimal d'abattement en 2020 en fonction du degré d'inertie socio-économique, variant de 0 à 50 ans (en abscisse) et du taux d'actualisation, 1, 3, 5 ou 10 %/an¹ (voir chaque courbe), pour une décision en univers certain (la sensibilité du climat vaut +3,5 °C, indiqué cert.) et pour une décision en présence d'incertitude sur ce paramètre avec arrivée d'information en 2020 (dans ce cas, la sensibilité du climat vaut en espérance +3,5 °C, indiqué app.).

Les résultats de cette analyse suggèrent donc qu'en présence d'incertitude, les dominances mises en évidence lors de l'analyse de sensibilité se maintiennent mais ne sont plus aussi caractérisées. Autrement dit, tandis qu'en univers certain les controverses autour du choix d'une *bonne* valeur pour le taux d'actualisation à retenir peuvent être très vives puisque la réponse optimale qui lui correspond à court-terme peut varier de plus d'un facteur 4, l'incertitude sur ce paramètre n'est plus aussi importante dans le cadre d'une approche séquentielle, en particulier si le choix se concentre autour des valeurs 3-5%/an-1 (valeurs plausibles compte tenu des taux de croissance du scénario de référence et des hypothèses classiques sur les préférences), impliquant dans ce cas unanimement un effort de réduction des émissions de 22%. Surtout ces résultats suggèrent que le surcroît d'effort observé à la Figure IV-22 ne peut s'expliquer par la présence d'inerties socio-économiques, qui sont pourtant un des facteurs jouant dans le sens d'une action précoce dans le cadre d'une approche séquentielle pour des politiques de stabilisation des concentrations (voir chapitre III).

C'est donc du côté des regrets environnementaux et de l'impact des contraintes climatiques qu'il faut chercher. S'agit-il plutôt de l'influence de la contrainte relative au rythme du réchauffement, déterminante sur le court-terme, ou de la contrainte relative à l'amplitude du réchauffement, déterminante sur le long-terme.

IV.1.2. Le rôle crucial de la contrainte de rythme

Un premier élément de réponse peut provenir d'une relecture de la Figure IV-22. Comparons comment varie le niveau d'abatement à court-terme quand l'information sur la sensibilité du climat arrive successivement en 2020, en 2040 et en 2050 (voir Figure IV-24). Dans le premier cas (courbe en trait plein noir), la réponse optimale est proche jusqu'en 2010 de la réponse en certain quand la sensibilité du climat vaut $+3,5\text{ }^{\circ}\text{C}$; elle se rapproche ensuite de la réponse en certain quand la sensibilité du climat vaut $+4,5\text{ }^{\circ}\text{C}$; une fois que l'information est disponible, chacune des trajectoires rejoint la trajectoire en certain à laquelle elle correspond et en reste proche. Quand l'information n'arrive qu'en 2040 (courbe en tirets noirs), la réponse optimale suit exactement la même trajectoire jusqu'en 2020 puis se rapproche à nouveau de la trajectoire optimale en certain quand la sensibilité du climat vaut $+3,5\text{ }^{\circ}\text{C}$; une fois que l'information est disponible, chacune des trajectoires rejoint les trajectoires en certain à laquelle elle correspond mais dans les cas où la sensibilité du climat vaut $+2,5$ ou $+3,5\text{ }^{\circ}\text{C}$, les efforts peuvent être moins intenses tandis que si la sensibilité du climat vaut effectivement $+4,5\text{ }^{\circ}\text{C}$, on assiste à un renchérissement des efforts. Enfin, quand l'information n'arrive qu'en 2050, la trajectoire optimale reste très proche de la trajectoire pire des cas certains (qui est aussi, on l'a vu, la trajectoire sous incertitude complète) jusqu'en 2030 puis peut s'en écarter ; une fois que l'incertitude est résolue, chacune des trajectoires rejoint les trajectoires en certain à laquelle elle correspond et comme précédemment, dans les cas où la sensibilité du climat vaut $+2,5$ ou $+3,5\text{ }^{\circ}\text{C}$, les efforts peuvent être moins intenses tandis que si la sensibilité du climat vaut effectivement $+4,5\text{ }^{\circ}\text{C}$, on assiste à un renchérissement des efforts.

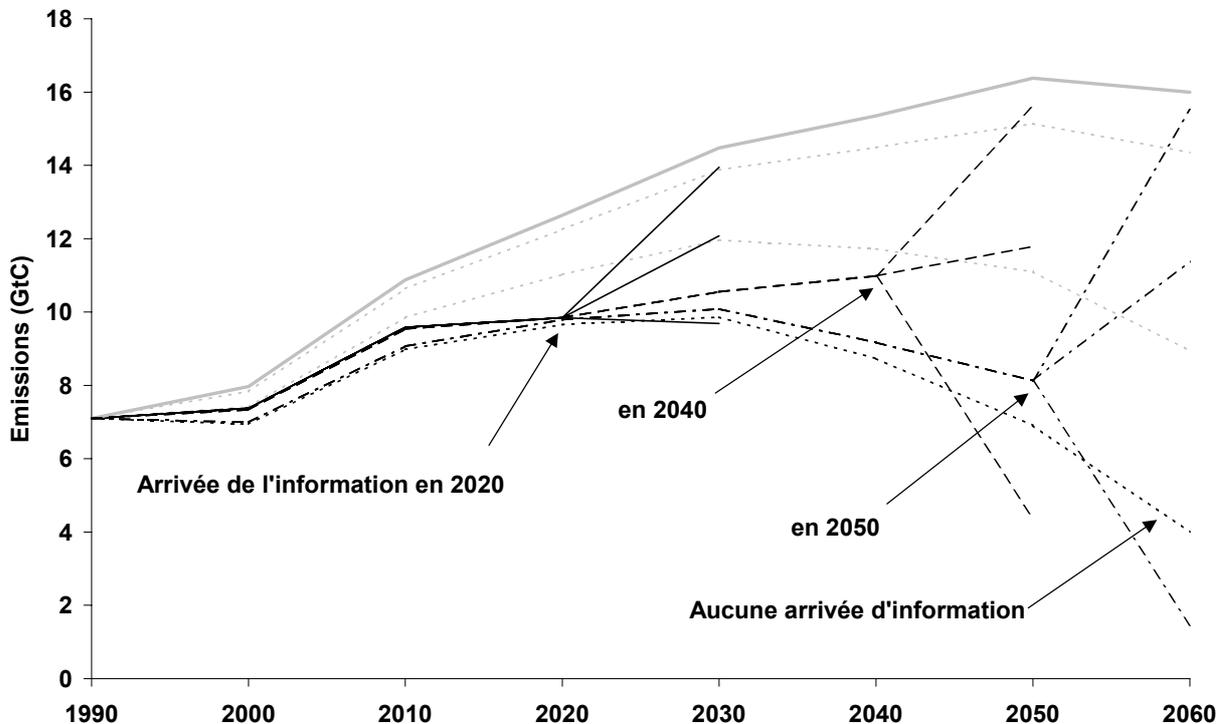


Figure IV-24. Politique climatique optimale en présence d'incertitude sur la sensibilité du climat quand l'information sur ce paramètre est disponible en 2020, 2040, 2050 ou jamais.

Pour simplifier la lecture, on passé en gris clair les éléments de la Figure IV-22 qui concernent les cas certains et la trajectoire d'émissions de référence.

Par analogie avec les résultats présentés au chapitre précédent pour des politiques de stabilisation des concentrations, on s'attendrait à ce que plus l'information est dévoilée tardivement, plus la réponse optimale se rapproche du pire des cas certains (sensibilité du climat à $+4,5\text{ }^{\circ}\text{C}$). C'est bien ce qu'on observe pour la politique de précaution au-delà de 2030 : quand l'incertitude est résolue en 2040, en 2050 (et dans le cas extrême, où aucune information n'arrive), la stratégie optimale est confondue avec le pire des cas certains. Avant 2030 cependant, toutes les trajectoires d'émissions sont très rapprochées du pire des cas certains dans une fenêtre 2010-2030 (quitte à éventuellement s'en éloigner par la suite). Quelque chose se produit donc dans cette fenêtre temporelle et empêche de profiter pleinement de la flexibilité qu'autorise l'acquisition future d'information. Nous savons que la contrainte sur le rythme décennal du réchauffement est déterminante sur le profil de la réponse optimale à cette période. Pourtant une contrainte comme $0,3\text{ }^{\circ}\text{C.décennie}^{-1}$ est aisément dominée par la contrainte sur le réchauffement de $+2\text{ }^{\circ}\text{C}$; la question se pose alors de savoir si son effet serait décuplé par l'incertitude sur la sensibilité du climat ?

Pour examiner cette hypothèse, nous avons effectué un nouveau jeu de simulations en ne modifiant que cette contrainte : elle est resserrée vers $+0,2\text{ }^{\circ}\text{C.décennie}^{-1}$ (Figure IV-25) et relâchée vers $+0,4\text{ }^{\circ}\text{C.décennie}^{-1}$ (Figure IV-26).

Quand la contrainte sur le rythme est relâchée de $+0,3$ vers $+0,4\text{ }^{\circ}\text{C.décennie}^{-1}$, on peut constater que les trajectoires optimales en univers certain sont pratiquement identiques ; on retrouve bien un des résultats de l'analyse de sensibilité sur l'influence croisée des contraintes climatiques sur la réponse optimale du modèle : pour des valeurs de supérieures ou égales à $+0,3\text{ }^{\circ}\text{C.décennie}^{-1}$, la contrainte de rythme est dominée par la contrainte sur l'amplitude du réchauffement (qui vaut ici $+2\text{ }^{\circ}\text{C}$) pour ce qui concerne la réponse de court-terme (voir Tableau IV-2).

Autrement dit, notre problème est presque équivalent (aux conditions exposées *supra*) à un problème de stabilisation de la concentration atmosphérique de CO_2 à une valeur pour le moment inconnue, à choisir parmi 442, 494 et 591 ppm. On retrouve donc sans surprise des résultats similaires à ceux mis en évidence par [Ha Duong et al., 1997] : plus l'information sur la sensibilité du climat est disponible tard, plus on est contraint à entreprendre des efforts importants à court-terme et plus la stratégie optimale de précaution se rapproche du pire des cas certains, jusqu'à être confondue avec celui-ci dans la perspective où l'incertitude n'est jamais résolue. Il y a bien un gain en terme d'efforts d'abatement à acquérir de l'information. Ce gain croît avec le temps mais de moins en moins puisque la stratégie optimale de précaution tend précisément à se rapprocher de la réponse optimale en incertitude complète plus l'information arrive tard, et ceci en raison de la pression de plus en plus forte exercée par le pire des cas (on cherche toujours à préserver l'option de stabilisation à 442ppm, ce qui correspond à un seuil de réchauffement de $+2\text{ }^{\circ}\text{C}$, la sensibilité du climat valant $+4,5\text{ }^{\circ}\text{C}$). Autrement dit, la stratégie de précaution induit des regrets économiques d'autant plus significatifs que l'information arrive tard. Avant une certaine date, ces regrets sont tempérés par les gains de flexibilité (pour le niveau d'effort de court-terme, avant la date d'apprentissage) qu'autorise l'acquisition future de connaissances scientifiques; au-delà d'une certaine date, l'arrivée d'information n'a presque plus d'impact sur la stratégie optimale (à court- et moyen-terme) compte tenu de l'effet d'attraction exercé par le pire des cas et ces regrets ne sont plus tempérés. La valeur de l'information est donc croissante, en particulier à la période où elle est la source d'une plus grande flexibilité, mais de moins en moins puisque son opportunité décroît.

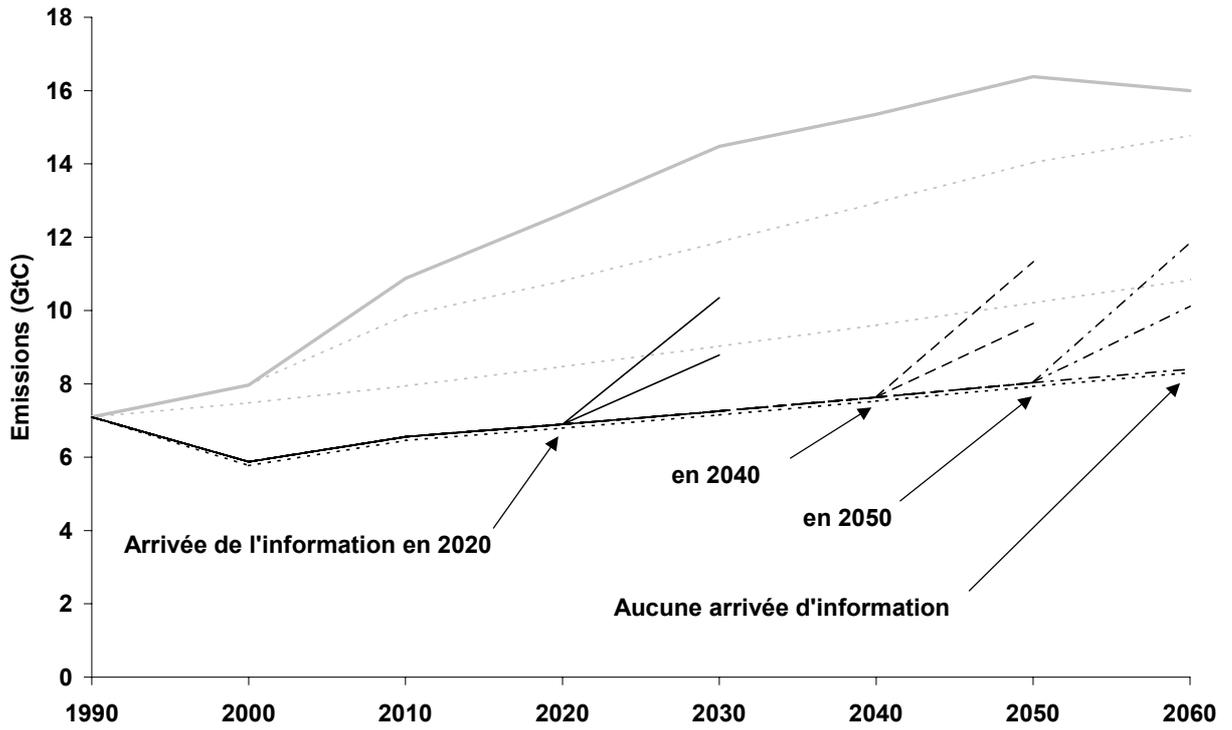


Figure IV-25. Comme pour la Figure IV-24 mais avec $\Delta_{RRT} = 0,2 \text{ } ^\circ\text{C} \cdot \text{décennie}^{-1}$.

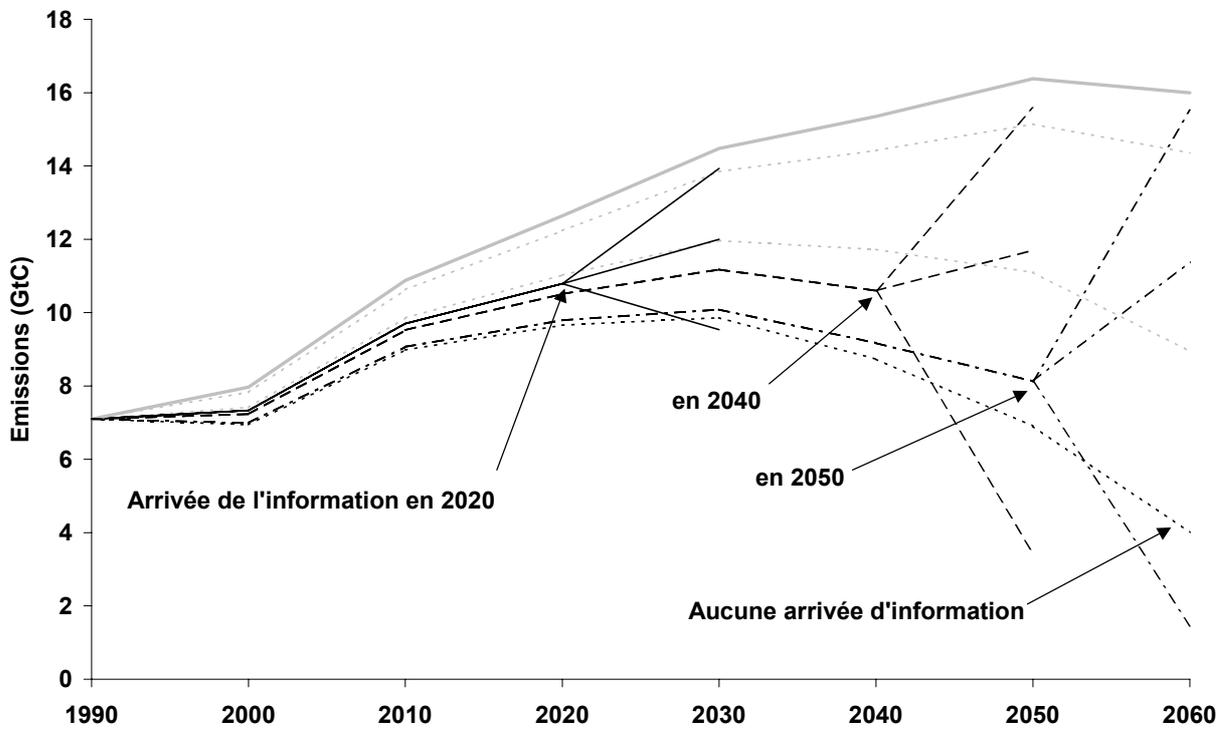


Figure IV-26. Comme pour la Figure IV-24 mais avec $\Delta_{RRT} = 0,4 \text{ } ^\circ\text{C} \cdot \text{décennie}^{-1}$.

Quand on resserre la contrainte, en revanche, de +0,3 vers +0,2 °C.décennie⁻¹, on constate sans surprise que les trajectoires optimales en univers certain correspondent à des efforts plus importants que dans le cas précédent. On retrouve là un des résultats de l'analyse de sensibilité sur l'influence croisée des contraintes climatiques sur la réponse optimale du modèle : pour une valeur égale à +0,2 °C.décennie⁻¹, la contrainte de rythme domine la contrainte sur l'amplitude du réchauffement si cette dernière est supérieure ou égale à +2 °C, pour ce qui concerne la réponse de court-terme (voir Tableau IV-2).

En présence d'incertitude sur la sensibilité du climat, avec apprentissage, on constate que, quelle que soit la date à laquelle de nouvelles connaissances seront disponibles (voire jamais), la stratégie optimale avant cette date est systématiquement confondue avec le pire des cas certains ; après cette date, la trajectoire correspondant à la situation où la sensibilité du climat vaut +4,5 °C reste, sans surprise, confondue avec le pire des cas certains et les autres trajectoires rejoignent les réponses optimales en cas certain auxquelles elles correspondent et en restent proches. Compte tenu des efforts très importants qu'il faut entreprendre dès aujourd'hui (éventuellement en pure perte), il y a un gain non négligeable à connaître dès aujourd'hui la valeur de la sensibilité du climat.

En conclusion, en présence d'incertitude sur la sensibilité du climat, le rôle de la contrainte de rythme sur le niveau d'effort à court-terme est magnifié par rapport à une situation en univers certain. Dans l'éventualité où ce paramètre prendrait la valeur +4,5 °C, on se trouve dans l'obligation d'entreprendre davantage de réductions des émissions pour les décennies à venir, et ce d'autant plus que la contrainte de rythme est resserrée. Si finalement, la valeur de la sensibilité du climat occupait une valeur plus basse, ces efforts, entrepris en pure perte, constitueraient un regret économique important. L'incertitude sur ce paramètre est donc un déterminant crucial de la stratégie optimale. Pour évaluer son importance, qui dépend de la valeur des contraintes environnementales et de la date d'arrivée de l'information, on peut calculer la valeur de l'information qui lui est attachée.

IV.1.3. Valeur de l'information sur la sensibilité du climat

Conformément à la section 'Valeur de quasi-option et valeur de l'information' au chapitre III, on définit la valeur de l'information, *Expected Value of Perfect Information (EVPI)*, comme la différence entre l'objectif du planificateur en présence d'incertitude avec arrivée d'information (appelée également, cas *Act then Learn* par [Manne et Richels, 1992]) et la moyenne, pondérée par les probabilités *ex ante* sur la sensibilité du climat, de l'objectif du planificateur en univers certain (appelée également, cas *Learn then Act*). Avec une telle mesure, on a un indicateur de comment croissent les regrets associés à une stratégie de précaution et de leur lien avec l'arrivée d'information : si entre deux dates consécutives, la valeur de l'information croît beaucoup, c'est qu'il est crucial du point de vue du décideur d'obtenir l'information avant cette période ; si en revanche cette valeur croît peu, c'est qu'il n'y a pas d'urgence à accélérer la résolution des incertitudes pendant cette période.

En reprenant les notations du modèle *RESPONSE_Θ*, on a l'écriture suivante :

$$EVPI(t_{info}) = \underbrace{\left(\sum_s p_s \sum_{t=1990}^{2300} \frac{f\left(Ab_{ATL(t_{info}),t}^s, Ab_{ATL(t_{info}),t-1}^s, t \right)}{(1+\rho)^{(t-1990)}} \right)}_{\text{Act then Learn policy}} - \underbrace{\left(\sum_s p_s \sum_{t=1990}^{2300} \frac{f\left(Ab_{LTA,t}^s, Ab_{LTA,t-1}^s, t \right)}{(1+\rho)^{(t-1990)}} \right)}_{\text{Learn then Act policy}}$$

avec $Ab_{LTA,t}^s$ séquence optimale d'abattement, l'état du monde étant s . C'est à dire la trajectoire optimale obtenue en univers certain, l'état du monde étant s .
 $Ab_{ATL(t_{info}),t}^s$ séquence optimale d'abattement, l'état du monde s étant révélé à la date t_{info} .

Comme on peut le voir d'après l'expression précédente, c'est l'échelle de la fonction de coût qui donne l'unité de la valeur de l'information ; nos coûts étant libellés en trillions US\$, c'est également l'unité de *EVPI*.

A. Valeur de l'information et degré d'inertie socio-économique

Nous avons donc calculé la valeur de l'information sur la sensibilité du climat selon sa date d'arrivée, pour différentes valeurs de la contrainte de rythme (0,1 à 0,4 °C.décennie⁻¹) et deux valeurs de l'inertie socio-économique, 20 et 60 ans. Les résultats sont présentés Figure IV-27.

En premier lieu, on peut constater que les résultats ne sont pas, sauf à une exception notable sur laquelle nous reviendrons, différenciés selon le degré d'inertie socio-économique. On retrouve en cela les conclusions de l'analyse de la Figure IV-23 : la stratégie optimale avant l'arrivée d'information est, dans notre cas, très peu ou pas du tout sensible au degré d'inertie socio-économique. Seule la situation où la contrainte de rythme est la plus resserrée fait exception. On doit se rappeler que pour satisfaire une telle contrainte, les efforts en 2000 et 2010 sont très intenses. Il y a donc une très grande accélération du taux d'abattement, qui dans les cas où le degré d'inertie socio-économique est élevé, ne manque pas d'occasionner un accroissement des coûts. Cet accroissement des coûts se reflète par construction dans la valeur de l'information et explique ses différences selon le degré d'inertie socio-économique.

En revanche, on doit remarquer que les résultats se différencient beaucoup plus selon la valeur de la contrainte de rythme : à la fois, sur leur niveau à l'infini et sur leur profil d'évolution.

- La valeur à l'infini, d'abord. C'est, d'après nos notations, $EVPI(2\ 300)$; on mesure donc avec cette grandeur l'ampleur des regrets associés au fait de ne jamais avoir à disposition l'information pour l'intégrer dans les stratégies de précaution. $EVPI(2\ 300)$ est ainsi une évaluation du coût de l'incertitude absolue (approchée par les regrets qu'elle implique) et nous nous en servons comme repère pour comparer les différentes incertitudes. Plus la contrainte de rythme se resserre, plus la valeur à l'infini croît (avec une différenciation marquée du degré d'inertie socio-économique pour la plus faible valeur) : ainsi, au fur et à mesure que cette contrainte décroît régulièrement de 0,4 à 0,1 °C.décennie⁻¹, la valeur à l'infini vaut successivement 0,136 ; 0,136 ; 0,213 (augmentation d'un peu plus de 50%) et 0,660 (inertie 20 ans) ou 1,406 (inertie 60 ans). Il y a donc un saut qualitatif entre les valeurs 0,2 et 0,1 °C.décennie⁻¹.
- Le profil d'évolution ensuite. La valeur de l'information ne croît pas régulièrement : dans tous les cas, on peut observer une accélération, qui se produit avant 2050. Il n'y a pas là de différenciation selon le degré d'inertie socio-économique mais à nouveau

selon la contrainte de rythme : entre 1990 et 2010, elle croît de 0 à 89% (inertie 60 ans)²⁰ de sa valeur à l'infini quand la contrainte vaut 0,1 °C.décennie⁻¹ puis suit une croissance beaucoup plus progressive ; quand la contrainte vaut 0,2 °C.décennie⁻¹, elle croît de 0 à 80% de sa valeur à l'infini entre 1990 et 2050 puis beaucoup plus progressivement ensuite ; quand la contrainte vaut 0,3 ou 0,4 °C.décennie⁻¹, elle croît au maximum jusqu'à 8% de sa valeur à l'infini entre 1990 et 2030 (40ans), puis dans les quarante années suivantes, de 8 à 80% et la croissance se poursuit ensuite à un taux beaucoup plus faible.

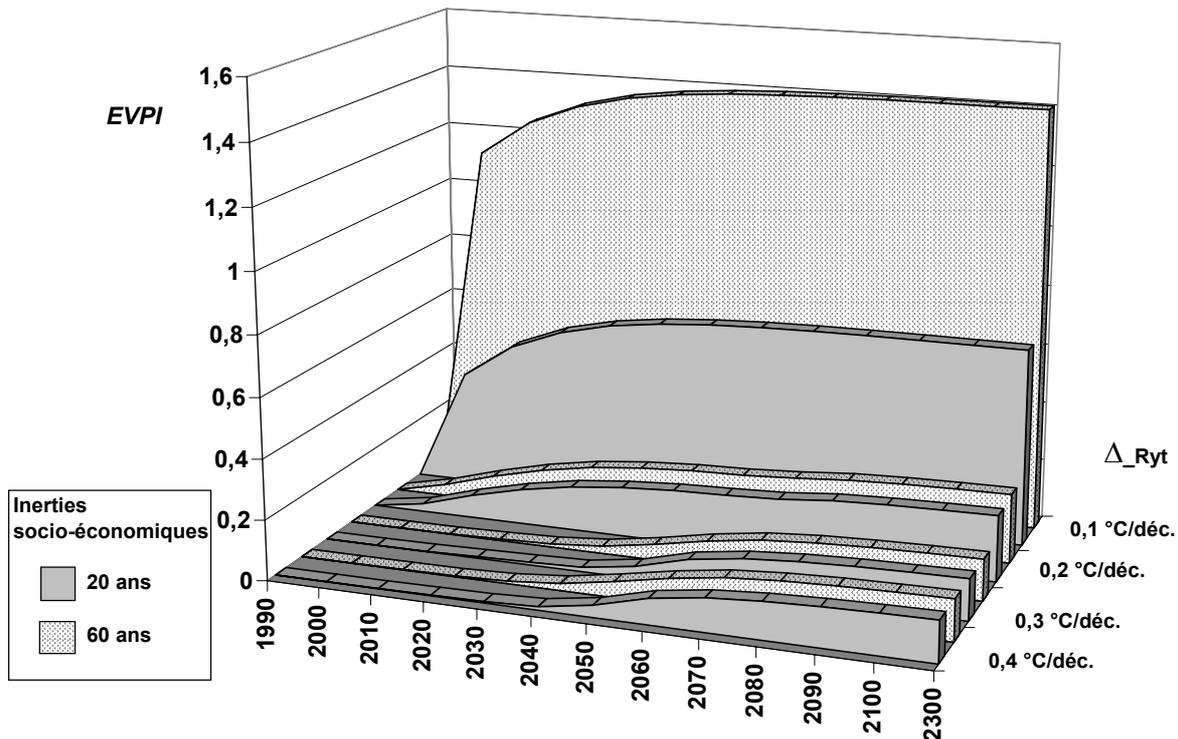


Figure IV-27. Valeur de l'information sur la sensibilité du climat en fonction de sa date d'arrivée pour différentes valeurs du degré d'inertie socio-économique (20 ans et 60 ans) et du rythme critique de changement climatique (0,1 ; 0,2 ; 0,3 et 0,4 °C.décennie⁻¹).

Compte tenu des fortes pressions exercées par les croyances les plus pessimistes dans un cadre coût-efficacité (on est obligé de satisfaire les contraintes quoi qu'il en coûte), la stratégie optimale avant l'arrivée d'information suit une trajectoire d'émissions restrictive, induisant ainsi un regret économique très élevé si la sensibilité du climat ne prend pas la valeur +4,5 °C.

Si l'information n'arrive jamais ou très tard, on a vu que la stratégie était (presque) confondue avec la réponse optimale pour le pire des cas certains. Plus la contrainte de rythme est resserrée, plus il s'agit d'une trajectoire coûteuse (et d'autant plus que l'inertie socio-économique est élevée) ; ceci explique que le niveau à long-terme est croissant plus la contrainte devient forte et plus le degré d'inertie socio-économique est élevé.

Que l'information arrive en 2070, 2080, 2090, n'induit pas de très grande différence dans ces regrets : il y a bien sûr toujours un peu plus d'efforts mais en terme de coûts actualisés cette différence n'est pas très importante ; à la fin du siècle, la valeur de l'information croît donc lentement.

²⁰ inertie 20 ans, respectivement : 76% de sa valeur à l'infini.

On a vu que plus la contrainte de rythme était resserrée, plus la stratégie optimale sous incertitude était rapprochée de la trajectoire sous incertitude complète (elle même confondue avec le pire des cas certains), induisant donc des regrets de plus en plus importants à court-terme : la valeur de l'information croît donc de plus en plus tôt au fur et à mesure qu'on resserre cette contrainte.

B. Valeur de l'information et contraintes sur l'amplitude et le rythme du réchauffement

Cette analyse rappelle ainsi l'importance de la contrainte de rythme pour la décision optimale de court-terme et souligne comment elle est renforcée en présence d'incertitude sur la sensibilité du climat. Ces résultats ont été obtenus pour une contrainte sur l'amplitude du réchauffement de +2 °C ; sont-ils conservés pour des valeurs différentes de cette contrainte ? Nous avons ainsi repris le même type d'analyse en croisant les deux contraintes climatiques et en examinant la valeur de l'information sur la sensibilité du climat. Les résultats sont présentés Figure IV-28.

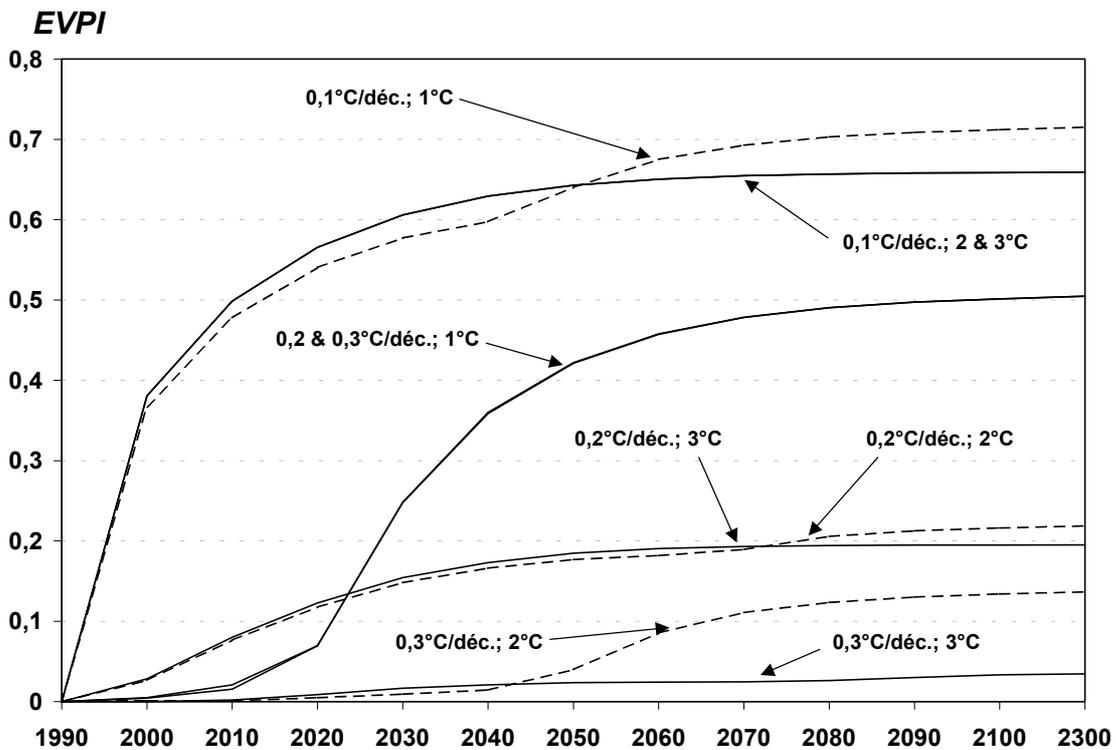


Figure IV-28. Valeur de l'information sur la sensibilité du climat en fonction de sa date d'arrivée pour différentes valeurs du niveau critique de réchauffement (+1 ; +2 et +3 °C) et du rythme critique de changement climatique (0,1 ; 0,2 et 0,3 °C.décennie⁻¹).

On peut constater que les résultats précédents sont bien conservés : plus la contrainte de rythme est resserrée, plus la valeur de l'information sur la sensibilité du climat est élevée (à contrainte sur l'amplitude égale, les courbes se classent de manière décroissante suivant la contrainte de rythme) ; la valeur de l'information sur la sensibilité du climat ne croît pas de

manière régulière (dans tous les cas, on observe un saut qualitatif qui s'amorce dès 2040)²¹ et plus la contrainte sur le rythme est resserrée, plus l'accélération est intense et se produit tôt.

Pour une contrainte sur l'amplitude du réchauffement de +1 °C, la valeur de l'information sur la sensibilité du climat est assez similaire, en terme d'ordre de grandeur, aux deux autres situations ($\Delta\theta_{MAX} = +2$ et 3 °C) quand la contrainte sur le rythme vaut 0,1 °C.décennie⁻¹. Son profil est légèrement différent toutefois : au lieu d'une croissance continue, rapide avec un pallier vers 2040, on observe une croissance rapide puis un pallier jusqu'en 2040 (et elle est à ce moment inférieure aux deux autres courbes), puis à nouveau une croissance plus rapide et un pallier (et elle est à ce moment supérieure aux deux autres courbes). On doit se souvenir (voir Tableau IV-2) qu'on est dans un domaine où les deux contraintes sont d'importance à peu près équivalente : l'une étant un peu plus importante pour le court-terme et nécessitant des efforts intenses à court-terme (la contrainte de rythme) et l'autre dominant nettement à long-terme et nécessitant des efforts soutenus (la contrainte d'amplitude). En présence d'incertitude sur la sensibilité du climat, faire beaucoup d'efforts à court-terme pour respecter la contrainte de rythme de 0,1 °C.décennie⁻¹ entraîne ainsi des regrets moins importants quand la contrainte sur l'amplitude est de +1 °C (car à plus long-terme ces efforts doivent être poursuivis pour satisfaire cette seconde contrainte) que quand elle a une valeur supérieure (car dans ce cas, de tels efforts peuvent vite être superflus). Le regret à court-terme associé à la contrainte de rythme est donc moins important pour une contrainte d'amplitude de +1 °C. A plus long-terme cependant, satisfaire une contrainte d'amplitude de +1 °C demande plus d'efforts donc plus de regrets que si cette contrainte est moins stricte ; le regret à long-terme devient donc supérieur.

Pour les autres valeurs de contraintes de rythme, la contrainte d'amplitude restant +1 °C, on peut remarquer que les courbes sont confondues, que la valeur de l'information sur la sensibilité du climat est plus importante que dans les cas +2° et +3 °C (la valeur à l'infini est au moins un peu plus du double) et la phase d'accélération est beaucoup plus rapide. Les éléments d'explication sont les mêmes que précédemment : la contrainte +1 °C domine systématiquement les contraintes +0,2 et +0,3 °C.décennie⁻¹ et les profils d'abattement sont identiques (donc les valeurs de l'information) ; pour satisfaire une telle contrainte, il faut entreprendre des efforts importants qui se différencient au fur et à mesure que le temps passe.

Quand la contrainte sur l'amplitude du réchauffement vaut +2 °C, les éléments d'explication sont les mêmes que précédemment : dominance de la contrainte de rythme quand elle vaut 0,1 °C.décennie⁻¹ impliquant un regret qui croît très vite à court-terme et est important ; codominance des contraintes 0,2 °C.décennie⁻¹ et +2 °C, la première à court-terme la seconde à long-terme, les regrets de court-terme sont donc un peu moins importants qu'avec la combinaison (0,2 °C.décennie⁻¹; +3 °C) mais un peu plus à long-terme ; dominance de la contrainte +2 °C sur la contrainte 0,3 °C.décennie⁻¹, les regrets liés à l'absence d'information croissent à long-terme avec une phase d'accélération quand la situation pire des cas attire complètement la stratégie de précaution.

Pour la contrainte +3 °C, on voit très nettement l'impact de la contrainte de rythme sur l'évolution des regrets liés à l'absence d'information sur la sensibilité du climat : plus la contrainte de rythme est importante plus ces regrets croissent tôt et sont élevés.

²¹ Même pour le cas +3°C/ 0,3°C.décennie⁻¹, où pour des raisons d'échelle, ce point n'est pas évident. Pourtant, dans ce cas, la valeur de l'information passe en 40 ans, de 2020 à 2080, de 14% de sa valeur à l'infini à 91%.

C. Valeur de l'information et croyances sur la sensibilité du climat

Enfin nous avons examiné la sensibilité de ces résultats aux croyances du planificateur. Elles interviennent deux fois dans le calcul de la valeur de l'information : une première fois, pour le calcul de la moyenne pondérée des objectifs correspondants à chacune des trajectoires en cas certain, et une seconde fois, dans la décision du planificateur en présence d'incertitude, puisque la stratégie optimale dépend entre autres du poids qu'il accorde à chacun des états du monde. Ces croyances, qui sont des distributions de probabilités d'occurrence d'un état du monde donné, correspondent aux probabilités subjectives *ex ante* du planificateur qu'on découvre bien que la sensibilité du climat vaut telle valeur, parmi les trois considérés $\{+2,5 \text{ }^\circ\text{C} ; +3,5 \text{ }^\circ\text{C} ; +4,5 \text{ }^\circ\text{C}\}$. Il peut les former à partir des informations en sa possession (les rapports du GIEC, par exemple), à partir de la demande sociale qui lui est adressée, à partir de son degré d'aversion au risque. Nous avons examiné successivement quatre croyances différentes :

- une croyance *centrée*, qui est celle avec laquelle nous avons mené nos calculs jusqu'à présent : les probabilités associées sont $\{1/6 ; 2/3 ; 1/6\}$ (moyenne $3,5 \text{ }^\circ\text{C}$) ;
- une croyance *neutre*, qui correspond à une application du Principe des raisons insuffisantes (il n'y pas assez d'information pour accorder plus de vraisemblance à l'une ou l'autre des valeurs de la sensibilité du climat) : on a donc une distribution équiprobable $\{1/3 ; 1/3 ; 1/3\}$ (moyenne $3,5 \text{ }^\circ\text{C}$) ;
- une croyance *optimiste*, où l'on espère très fortement que tout ira bien (elle est donc concentrée à gauche) : les probabilités associées sont $\{2/3 ; 1/6 ; 1/6\}$ (moyenne $+3 \text{ }^\circ\text{C}$) ;
- une croyance *pessimiste*, où tout ira mal (elle est donc concentrée à droite) : les probabilités associées sont les symétriques de la situation précédente $\{1/6 ; 1/6 ; 2/3\}$ (moyenne $+4 \text{ }^\circ\text{C}$).

Pour ces quatre croyances, nous avons calculé la valeur de l'information sur la sensibilité du climat comme à la section précédente : contrainte sur l'amplitude du réchauffement de $+2 \text{ }^\circ\text{C}$ et contrainte sur le rythme décennal de réchauffement de $0,1 ; 0,2$ et $0,3 \text{ }^\circ\text{C.décennie}^{-1}$ respectivement. Les résultats sont présentés Figure IV-29.

On peut constater que pour chaque croyance, les résultats concernant les liens entre amplitude et profil de la valeur de l'information selon sa date d'arrivée et la contrainte de rythme sont conservés : plus la contrainte de rythme est resserrée, plus la valeur de l'information sur la sensibilité du climat est élevée (les courbes se classent de manière décroissante suivant la contrainte de rythme et il y a un saut qualitatif entre $0,1$ et $0,2 \text{ }^\circ\text{C.décennie}^{-1}$) ; la valeur de l'information sur la sensibilité du climat ne croît pas de manière régulière (dans tous les cas, on observe un saut qualitatif qui s'amorce dès 2040) et plus la contrainte sur le rythme est resserrée, plus l'accélération est intense et se produit tôt.

Quand on compare les résultats entre les jeux de croyances, on peut remarquer d'emblée qu'ils sont très différenciés : la valeur de l'information sur la sensibilité du climat pour la croyance optimiste est toujours supérieure (et de loin) aux autres situations ; pour les croyances centrée et neutre, ces valeurs sont proches et pour la croyance pessimiste, la valeur de l'information est toujours systématiquement inférieure (et de loin) à toutes les autres configurations. Il y a peu de différence pour les croyances centrée et neutre : les évolutions sont très similaires et du même ordre de grandeur ; simplement, les résultats pour la croyance neutre sont systématiquement inférieurs à ceux obtenus pour la croyance centrée. Pour les deux croyances dissymétriques, en revanche, les différences sont bien plus importantes : la valeur de l'information pour la croyance optimiste est toujours très largement supérieure à celle pour la croyance pessimiste et

cette différence s'accroît quand on resserre la contrainte de rythme (quand elle vaut $0,3 \text{ } ^\circ\text{C.décennie}^{-1}$, le rapport optimiste/pessimiste passe de 1,1 à court-terme (2010) à 2,7-2,8 au delà de 2080 ; quand elle vaut $0,2 \text{ } ^\circ\text{C.décennie}^{-1}$, ce rapport vaut initialement 2,5 et passe dès 2020 à 2,7-2,8 ; quand elle vaut $0,1 \text{ } ^\circ\text{C.décennie}^{-1}$, ce rapport est compris entre 2,8 et 2,85).

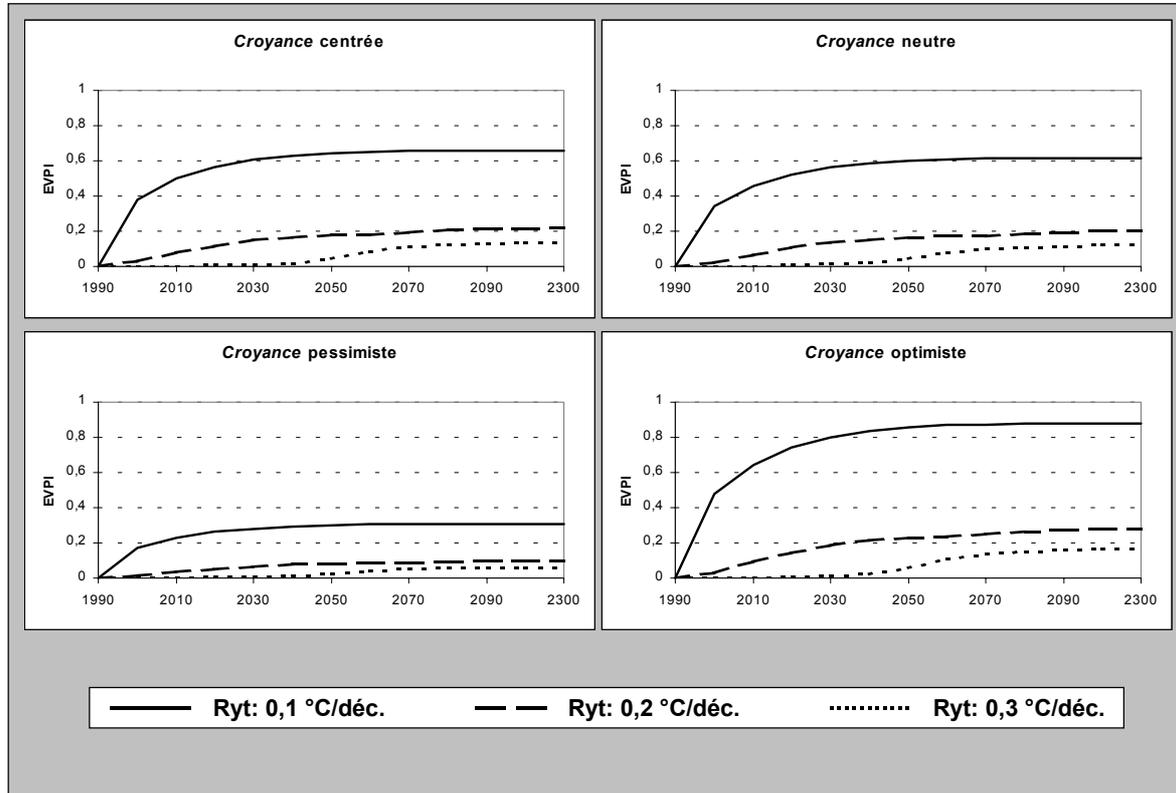


Figure IV-29. Valeur de l'information sur la sensibilité du climat en fonction de sa date d'arrivée pour différentes croyances *a priori* sur ce paramètre (niveau *critique* de réchauffement $+2 \text{ } ^\circ\text{C}$).

Pourquoi observe-t-on une telle différence selon les croyances ? On doit remarquer que quand on balaie les croyances dans le sens optimiste, centrée, neutre puis pessimiste, on accorde de plus en plus d'importance au pire des cas (celui qui oblige à entreprendre le plus d'efforts, quand la sensibilité du climat vaut $+4,5 \text{ } ^\circ\text{C}$) et de moins en moins à son symétrique (sensibilité du climat à $+2,5 \text{ } ^\circ\text{C}$). Autrement dit, si on est pessimiste, la stratégie optimale avant l'arrivée d'information est d'emblée assez proche du pire des cas certains et elle en est davantage éloignée si on est optimiste. On peut le vérifier sur la Figure IV-30, pour une contrainte sur l'amplitude du réchauffement de $+2 \text{ } ^\circ\text{C}$ et pour une contrainte de rythme de $0,3 \text{ } ^\circ\text{C.décennie}^{-1}$. De plus, on peut constater que quand on est pessimiste, il y a peu de flexibilité associée à la valeur de l'information : qu'elle arrive en 2020, en 2030, en 2050, on se rapproche de plus en plus de la stratégie optimale sous incertitude complète (qui est confondue avec le pire des cas certains). Dans cette situation, l'information n'a pas beaucoup de valeur donc. Quand on est optimiste en revanche, on peut constater que l'arrivée d'information autorise un plus grande flexibilité : pas pour les premières décennies, on l'a vu, à cause du poids de la contrainte de rythme, mais quand l'information arrive plus tard. Dans cette configuration, l'information a donc beaucoup plus de valeur.

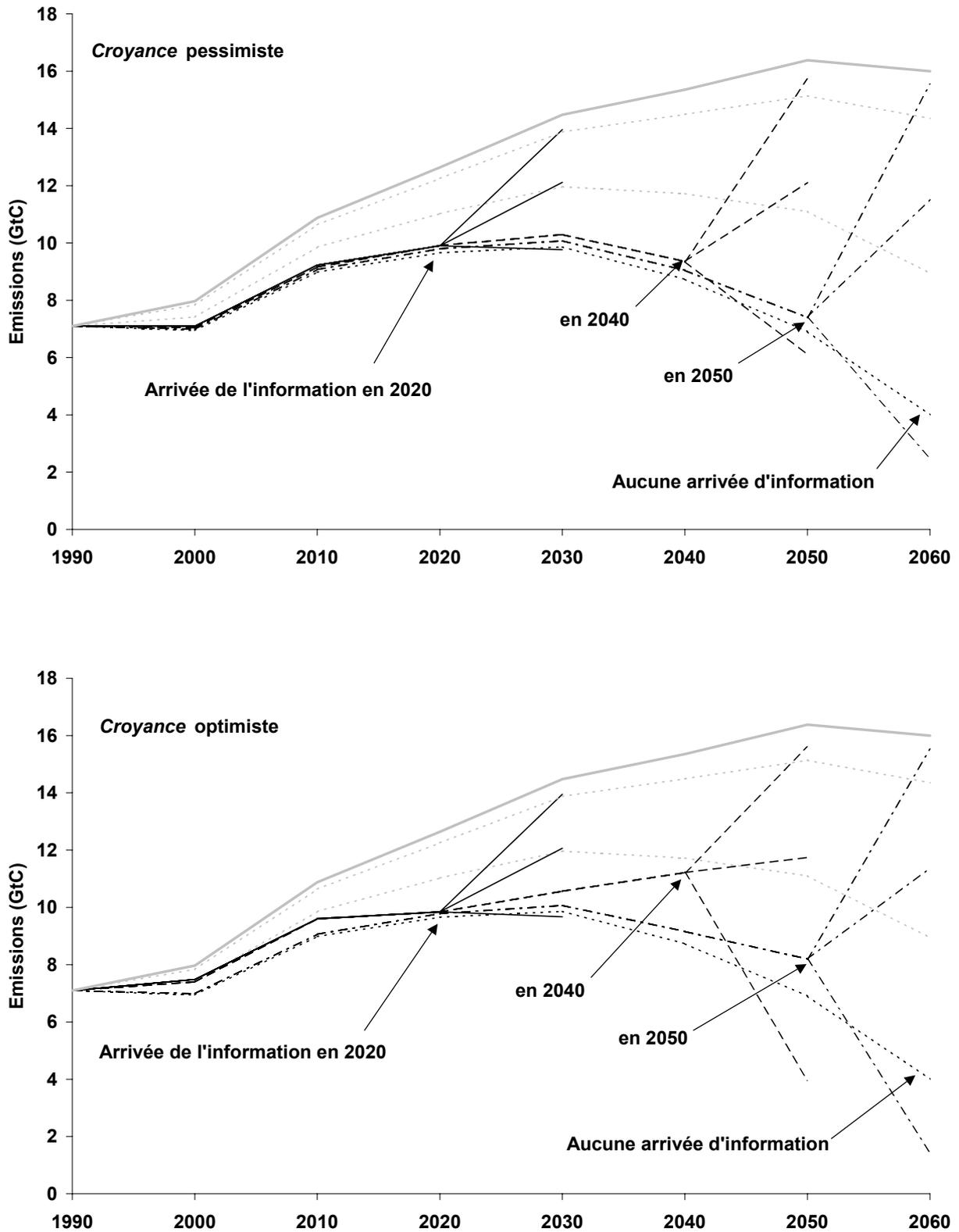


Figure IV-30. Politique climatique optimale en présence d'incertitude sur la sensibilité du climat quand l'information sur ce paramètre est disponible en 2020, 2040, 2050 ou jamais. En haut, pour une croyance pessimiste ; en bas, pour une croyance optimiste sur la dynamique du climat.

En conclusion, on pu vérifier que l'incertitude sur la sensibilité du climat est particulièrement importante vis à vis de la décision : quand on prend en compte l'incertitude sur ce paramètre, la stratégie optimale implique de suivre des profils d'abattement plus stricts (à court-terme notamment) que lorsqu'on considère seulement son espérance. Compte tenu du cadre coût-efficacité qui contraint à préserver systématiquement les options environnementales les plus restrictives pour les émissions, la stratégie de précaution implique donc des regrets économiques importants et plus l'information arrive tard, plus la stratégie optimale de précaution se confond avec la réponse optimale correspondant au pire des cas certains. L'arrivée d'information permet de suivre une trajectoire d'émissions plus émettrice que dans une situation où l'incertitude est complète mais plus l'incertitude est levée tardivement, moins cet effet est important (et c'est particulièrement net au-delà de 2050). La valeur de l'information attachée à la sensibilité du climat croît donc soudainement à cette période : autrement dit, il serait très souhaitable de connaître avant la seconde moitié du siècle la valeur de ce paramètre - ce qui ne semble pas assuré pour le moment.

On a pu explorer comment ces résultats se conservaient pour différentes croyances sur la dynamique du climat et en particulier comment le profil temporel de la valeur de l'information s'accroissait moins on accordait d'importance au pire des cas (sensibilité haute, à +4,5 °C). On a pu également relever comment les contraintes climatiques influençaient la stratégie de précaution, en impliquant encore plus d'efforts à court-terme, en particulier plus la contrainte de rythme est stricte. C'est à dire qu'en présence d'incertitude sur la sensibilité du climat, l'impact de la contrainte de rythme sur la décision de court-terme est magnifié et symétriquement la valeur de l'information sur la sensibilité du climat croît beaucoup plus vite plus cette contrainte est stricte. On retrouve ainsi les résultats de l'analyse de sensibilité du modèle mais l'importance de la contrainte de rythme sur la décision des prochaines décennies en est encore augmentée : par exemple, la contrainte +0,3 °C.décennie¹ est dominée en univers certain par la contrainte +2 °C, ce qui n'est plus le cas en présence d'incertitude sur la sensibilité du climat.

Ces deux contraintes climatiques sont donc également cruciales pour la décision (on peut se reporter aux résultats de l'analyse de sensibilité pour s'en convaincre). Nous avons donc suivi le même genre d'approche que précédemment pour étudier leur impact sur la stratégie optimale de précaution : quelle est leur importance relative selon les temps de la décision ?, comment se classe la valeur de l'information sur chacune de ces contraintes par rapport à la valeur de l'information sur la sensibilité du climat ?

IV.2. Politique climatique de précaution en présence d'incertitude sur le niveau critique de réchauffement

Dans un premier temps, nous avons donc étudié l'incertitude sur la contrainte d'amplitude du réchauffement. Nous avons ainsi reformulé le modèle *RESPONSE_Θ* pour représenter une situation de recherche de politique climatique optimale en présence d'incertitude sur cette contrainte (voir Encadré IV-3).

Nous avons considéré trois états du monde (*s*), caractérisés par la valeur que peut prendre le niveau critique de réchauffement à l'échelle globale, $\Delta\theta^S_{MAX} \in \{+1 \text{ °C}; +2 \text{ °C}; +3 \text{ °C}\}$. A ces trois états du monde sont associées les probabilités subjectives *ex ante* suivantes (*p_s*) {1/3 ; 1/3 ; 1/3} (distribution équiprobable). Il s'agit donc d'une croyance neutre, celle du sceptique face à la qualité des informations sur les impacts et les dommages aujourd'hui disponibles. Les

spécifications pour ce qui concerne l'arrivée d'information et le processus de décision sont les mêmes que précédemment. Notons simplement que la sensibilité du climat occupe maintenant de manière certaine sa valeur centrale (+3,5 °C) ; nous entreprenons néanmoins une analyse de sensibilité en envisageant ses deux valeurs extrêmes.

Encadré IV-3. Politiques climatique de précaution en présence d'incertitude sur le niveau critique de réchauffement : évaluation à l'aide du modèle *RESPONSE_Θ*.

Le code du modèle est disponible en annexe.

Fonction objectif : minimisation de l'espérance de la somme actualisée des coûts d'abattement

$$\text{Min}_{Ab_t^s} \sum_s p_s \sum_{t=1990}^{2300} \frac{f(Ab_t^s, Ab_{t-1}^s, t)}{(1+\rho)^{(t-1990)}}$$

Contrainte sur l'amplitude du réchauffement moyen global

$$\forall t, (\theta_{At}^s(t) - \theta_{At}^s(1990)) \leq \Delta\theta_{MAX}^s$$

Contrainte de limitation du rythme décennal d'évolution de la température moyenne globale

$$\forall t, t \geq 2010, (\theta_{At}^s(t+10) - \theta_{At}^s(t)) \leq \Delta_{RYT}$$

Contrainte non anticipative

$$\forall t \leq t_{info}, \forall (s, s') \in S, Ab_t^s = Ab_t^{s'}$$

Emissions de référence de CO₂ (em_t)

données exogènes, tirées du scénario de référence (A1-m).

Cycle du carbone

$$\begin{pmatrix} A_{t+1}^s \\ B_{t+1}^s \\ O_{t+1}^s \end{pmatrix} = C_{trans} \cdot \begin{pmatrix} A_t^s \\ B_t^s \\ O_t^s \end{pmatrix} + \delta \cdot (1 - Ab_t^s) em_t \cdot \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}$$

Evolution de la température moyenne globale

$$\begin{cases} \theta_{At}^s(t+1) \\ \theta_{Oc}^s(t+1) \end{cases} = \begin{bmatrix} 1 - \sigma_1(\lambda + \sigma_2) & \sigma_1\sigma_2 \\ \sigma_3 & 1 - \sigma_3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \theta_{At}^s(t) \\ \theta_{Oc}^s(t) \end{bmatrix} + \sigma_1 \begin{bmatrix} F_{2X} \frac{\log\left(\frac{A_t^s}{A_{pl}}\right)}{\log 2} \\ 0 \end{bmatrix}$$

Munis de cette nouvelle version du modèle *RESPONSE_Θ*, nous avons calculé la valeur de l'information sur la contrainte d'amplitude du réchauffement, selon la date de résolution de l'incertitude, en croisant les valeurs de la sensibilité du climat, +2,5 ; +3,5 et +4,5 °C, et celles de la contrainte de rythme, de 0,1 à 0,4 °C.décennie⁻¹. Les résultats sont présentés Figure IV-31.

On constate d'emblée que, à sensibilité du climat fixée, la valeur de l'information sur la contrainte d'amplitude du réchauffement est très nettement différenciée selon la valeur de la contrainte relative au rythme du réchauffement : les courbes de la valeur de l'information se classent sans ambiguïté de manière croissante quand la contrainte relative au rythme se resserre. La courbe associée à une contrainte de 0,1 °C.décennie⁻¹ est ainsi systématiquement la plus inférieure et celle associée à 0,4 °C.décennie⁻¹, la plus supérieure : à l'infini, les valeurs de l'information dans les deux cas entretiennent un rapport de l'ordre d'un facteur 9 (conservé quelle que soit la valeur de la sensibilité du climat). Entre ces deux extrêmes, les autres courbes ne sont pas réparties de manière régulière : il existe un saut qualitatif quand on passe d'une contrainte comme 0,1 °C.décennie⁻¹ à des contraintes comme 0,2 ou 0,3 °C.décennie⁻¹ ; les courbes correspondant à ces contraintes sont en effet beaucoup plus proches de la courbe associée à la contrainte 0,4 °C.décennie⁻¹ (la courbe 0,3 °C.décennie⁻¹ lui étant pratiquement identique). Ce classement n'est pratiquement pas affecté par la sensibilité du climat.

Ces courbes se différencient également en fonction de la valeur de la contrainte sur le rythme de réchauffement quant à leur profil temporel d'évolution, et à nouveau cette différence est entre 0,1 °C.décennie⁻¹ et les autres valeurs. Toutes présentent une accélération mais la date à laquelle elle débute et son ampleur sont différentes : quand la contrainte sur le rythme vaut 0,1 °C.décennie⁻¹, la valeur de l'information sur l'objectif de long-terme des politiques climatiques reste nulle au moins jusqu'en 2040 puis croît en moins de quarante ans de 80% de sa valeur à l'infini ; pour les autres valeurs de la contrainte de rythme, la valeur de l'information n'est pas nulle (sauf à la première date, bien sûr), croît plus tôt (la transition s'amorce dès 2020) mais à un rythme moins soutenu. Pour différentes valeurs de la sensibilité du climat, ces résultats se conservent bien. Deux différences cependant. Premièrement, plus la sensibilité du climat croît, plus la valeur de l'information sur la contrainte de long-terme croît (et ceci dans un rapport qui n'est pas affecté par la contrainte de rythme). Deuxièmement, plus la sensibilité du climat croît, plus la date où débute l'accélération s'avance (ici, on gagne une dizaine d'années quand la sensibilité du climat croît de +1 °C).

On se rappelle (voir l'analyse de sensibilité du modèle sur les contraintes climatiques), que la contrainte sur l'amplitude du réchauffement est une contrainte essentiellement déterminante sur le volume cumulé des émissions - peu d'efforts d'abattement à court-terme peuvent être dans une certaine mesure rattrapés par davantage d'efforts à plus long-terme, les efforts croissent donc régulièrement - et qu'en l'absence de contrainte de rythme, les trajectoires d'abattement sont bien différenciées à court-terme et à long-terme selon la valeur de la contrainte sur l'amplitude du réchauffement - +1 °C impose des efforts très stricts, +2 °C des efforts cumulés moins importants et plus répartis dans le temps, etc. Dans ce cas donc, les regrets (faire en sorte de toujours pouvoir satisfaire la contrainte la plus stricte) croissent de manière régulière avec le temps ; on souhaiterait donc de plus en plus acquérir de l'information pour éviter toutes ces dépenses inutiles... jusqu'au moment où pour respecter le seuil de réchauffement le plus bas, on est obligé de suivre une trajectoire d'abattement très restrictive. A partir de cette date, avoir l'information dix ans plus tôt ne change pas grand-chose pour la stratégie optimale d'abattement avant l'arrivée d'information, la valeur de l'information ne croît plus que faiblement (et ce d'autant plus que le taux d'actualisation écrase le long-terme).

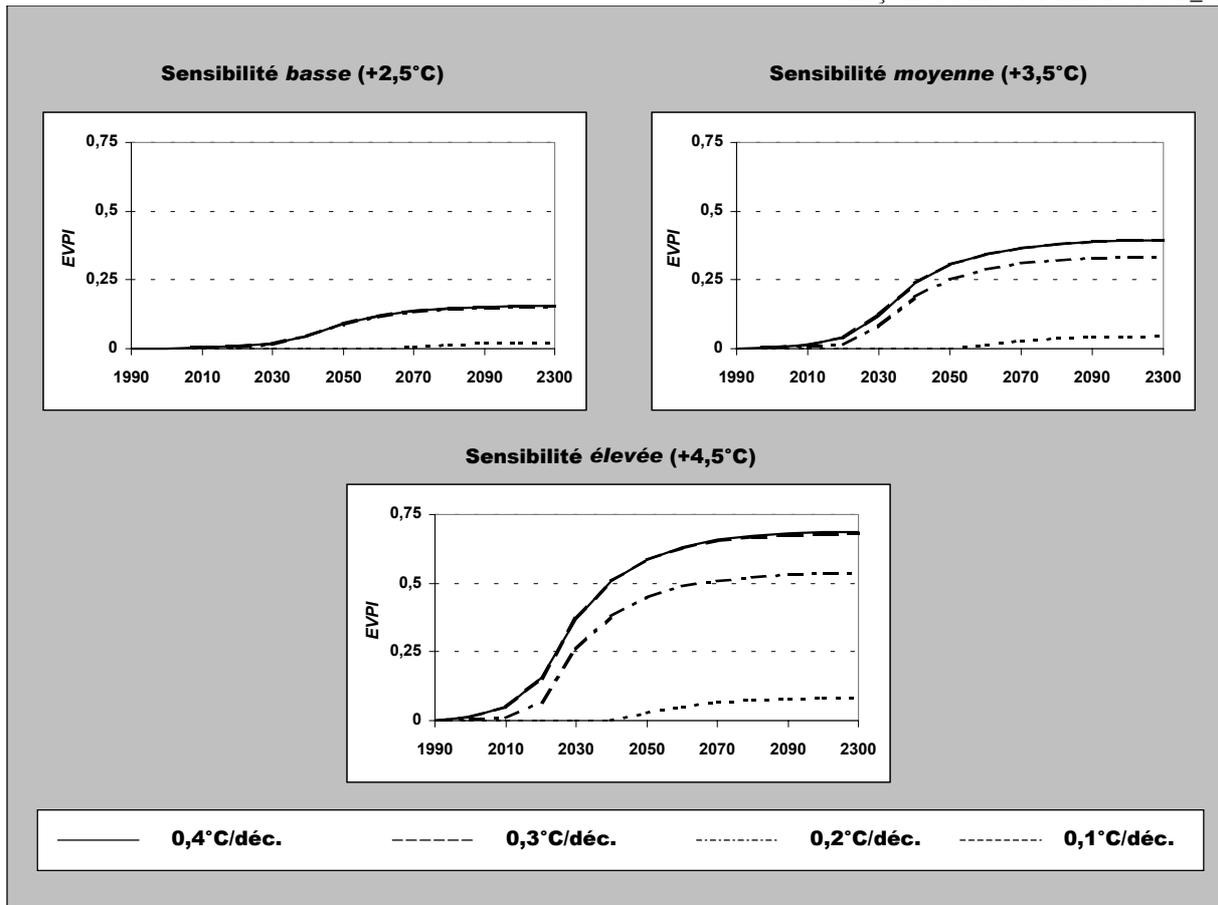


Figure IV-31. Valeur de l'information sur le niveau *critique* de réchauffement en fonction de sa date d'arrivée pour différentes valeurs de la sensibilité du climat et du rythme critique de changement climatique.

Quand on surimpose à la contrainte sur l'amplitude du réchauffement à long-terme une contrainte sur le rythme du réchauffement (dont on a vu qu'elle était déterminante sur l'effort de court terme), les regrets à court-terme sont beaucoup moins importants, puisqu'il faut de toute façon accomplir des réductions des émissions pour satisfaire la contrainte de rythme. La valeur de l'information est donc inférieure à la situation précédente et croît plus lentement (elle est même systématiquement nulle quand la contrainte sur le rythme vaut $0,1 \text{ }^\circ\text{C.décenn}^{-1}$). Quand cette contrainte est très stricte ($0,1 \text{ }^\circ\text{C.décenn}^{-1}$), on a vu que les efforts pendant la seconde moitié du siècle pouvaient décroître pour satisfaire des objectifs de long-terme comme $+2$ ou $+3 \text{ }^\circ\text{C}$ et que seule une contrainte comme $+1 \text{ }^\circ\text{C}$ impose de poursuivre les efforts ; les regrets sont donc en moyenne moins importants, croissent plus tard et la valeur de l'information à l'infini est donc plus faible. Surtout, la stratégie optimale avant l'arrivée d'information est très vite proche du pire des cas (contrainte $+1 \text{ }^\circ\text{C}$) une fois que la contrainte de rythme a cessé de s'exprimer ; la valeur de l'information croît donc très rapidement pendant ces quelques décennies.

La sensibilité du climat accentuant le rythme de réchauffement et creusant l'écart entre les niveaux de stabilisation des concentrations et les seuils de réchauffement (voir Figure IV-12), on n'est pas surpris de voir la valeur de l'information sur l'objectif de long-terme croître selon ce paramètre et croître plus tôt.

IV.3. Politique climatique de précaution en présence d'incertitude sur le rythme critique de réchauffement

Dans un second temps, nous avons donc étudié l'incertitude sur la contrainte de rythme décennal du réchauffement. Nous avons ainsi reformulé le modèle *RESPONSE_Θ* pour représenter une situation de recherche de politique climatique optimale en présence d'incertitude sur cette contrainte (voir Encadré IV-4).

Encadré IV-4. Politiques climatiques de précaution en présence d'incertitude sur le rythme critique de réchauffement : évaluation à l'aide du modèle *RESPONSE_Θ*.
Le code du modèle est disponible en annexe.

Fonction objectif :

minimisation de l'espérance de la somme actualisée des coûts d'abattement

$$\text{Min}_{Ab_t^s} \sum_s p_s \sum_{t=1990}^{2300} \frac{f(Ab_t^s, Ab_{t-1}^s, t)}{(1+\rho)^{(t-1990)}}$$

Contrainte sur l'amplitude du réchauffement moyen global

$$\forall t, (\theta_{At}^s(t) - \theta_{At}^s(1990)) \leq \Delta\theta_{MAX}$$

Contrainte de limitation du rythme décennal d'évolution de la température moyenne globale

$$\forall t, t \geq 2010, (\theta_{At}^s(t+10) - \theta_{At}^s(t)) \leq \Delta_{RYT}^s$$

Contrainte non anticipative

$$\forall t \leq t_{info}, \forall (s, s') \in S, Ab_t^s = Ab_t^{s'}$$

Emissions de référence de CO₂ (em)

données exogènes, tirées du scénario de référence (A1-m).

Cycle du carbone

$$\begin{pmatrix} A_{t+1}^s \\ B_{t+1}^s \\ O_{t+1}^s \end{pmatrix} = C_{trans} \cdot \begin{pmatrix} A_t^s \\ B_t^s \\ O_t^s \end{pmatrix} + \delta \cdot (1 - Ab_t^s) em_t \cdot \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}$$

Evolution de la température moyenne globale

$$\begin{cases} \theta_{At}^s(t+1) \\ \theta_{Oc}^s(t+1) \end{cases} = \begin{bmatrix} 1 - \sigma_1(\lambda + \sigma_2) & \sigma_1\sigma_2 \\ \sigma_3 & 1 - \sigma_3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \theta_{At}^s(t) \\ \theta_{Oc}^s(t) \end{bmatrix} + \sigma_1 \begin{bmatrix} F_{2X} \frac{\log\left(\frac{A_t^s}{A_{PI}}\right)}{\log 2} \\ 0 \end{bmatrix}$$

Nous avons considéré trois états du monde (s), caractérisés par la valeur que peut prendre le niveau critique de réchauffement à l'échelle globale, $\Delta\theta_{RYT}^s \in \{+0,1 \text{ } ^\circ\text{C.décennie}^{-1}\}$;

+0,2 °C.décennie⁻¹; +0,3 °C.décennie⁻¹). A ces trois états du monde sont associées les probabilités subjectives *ex ante* suivantes (p) {1/3 ; 1/3 ; 1/3} (distribution équiprobable). Il s'agit donc d'une croyance neutre, celle du sceptique face à la qualité des informations sur les impacts et les dommages aujourd'hui disponibles. Les spécifications pour ce qui concerne l'arrivée d'information et le processus de décision sont les mêmes que précédemment. Notons simplement que le niveau critique de réchauffement a maintenant de manière certaine sa valeur centrale (+2 °C).

Munis de cette nouvelle version du modèle *RESPONSE_Θ* , nous avons calculé la valeur de l'information sur la contrainte de rythme du réchauffement, selon la date de résolution de l'incertitude, en croisant les valeurs de la sensibilité du climat, +2,5 ; +3,5 et +4,5 °C, et celles de la contrainte de amplitude, de 1 à 3 °C. Les résultats sont présentés Figure IV-32.

D'emblée, on constate que la valeur de l'information sur le rythme critique de réchauffement croît très vite par rapport à sa valeur de long-terme : dans tous les cas, c'est à dire quelles que soient les valeurs de la sensibilité du climat et de la contrainte relative à l'amplitude du réchauffement, elle atteint plus de 50% de sa valeur à l'infini en trente ans.

On peut constater que, à sensibilité du climat donnée, les différentes courbes de la valeur de l'information sur la contrainte de rythme se différencient selon la contrainte sur l'amplitude du réchauffement pour ce qui concerne leur niveau : elles se classent de manière croissante quand cette contrainte est relâchée, avec un saut qualitatif quand on passe de +1 °C à +2 ou 3 °C (pour ces deux derniers cas, les courbes sont très rapprochées et la valeur de l'information est plus du double de celle quand la contrainte vaut +1 °C). De même, la croissance de la valeur de l'information est beaucoup plus rapide plus la contrainte d'amplitude est stricte : on atteint un niveau donné de la valeur de l'information à l'infini pour une contrainte de 2 ou 3 °C 20 ans plus tôt quand la contrainte vaut +1 °C.

Quand la sensibilité du climat croît, la valeur de l'information croît mais dans l'ensemble, les rapports précédents sont conservés. Surtout, c'est l'allure des courbes qui est modifiée : plus la sensibilité croît, plus la valeur de l'information se rapproche rapidement de sa valeur à l'infini (le décalage n'est là plus que de 10 ans).

On se rappelle que la contrainte de rythme exerce une très forte influence sur les niveaux d'abattement pour les premières décennies du siècle : plus elle est stricte, plus on doit fournir d'efforts pour la respecter. Supposons qu'on cherche à ne pas dépasser un seuil de réchauffement à long-terme de +2 °C ; selon que le rythme dangereux de réchauffement climatique vaut 0,1 ; 0,2 ou 0,3 °C.décennie⁻¹, on doit fournir en 2010 des efforts d'abattement représentant respectivement 54, 27 et 10% des émissions de référence. Un très important regret s'exprime donc pendant cette période si on ne sait pas quelle contrainte de rythme on doit satisfaire, sachant qu'en présence d'incertitude sur ce point, on cherche à respecter la plus stricte. L'information a donc une grande valeur et elle croît très rapidement à cette période.

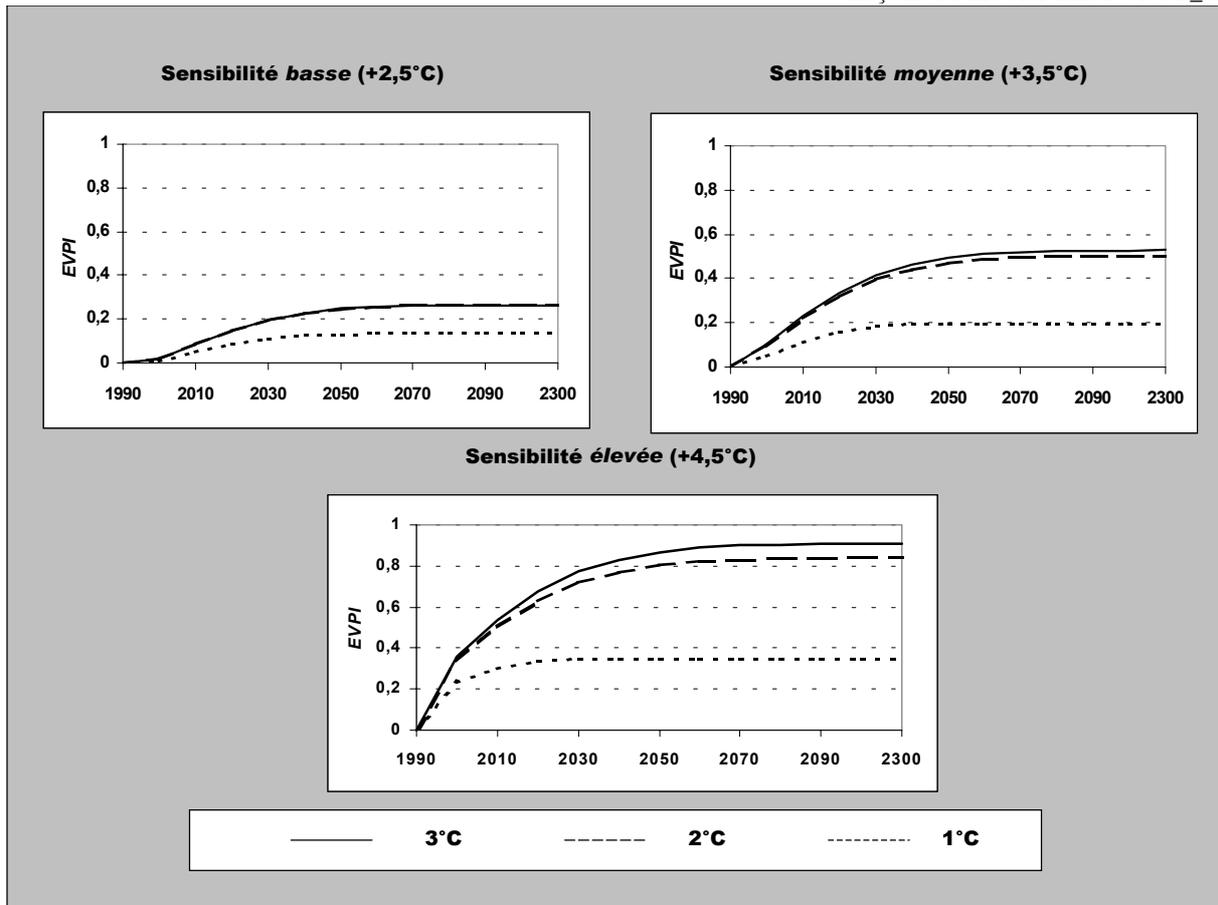


Figure IV-32. Valeur de l'information sur le rythme *critique* de réchauffement en fonction de sa date d'arrivée pour différentes valeurs de la sensibilité du climat et du niveau critique de changement climatique.

A partir de 2030-2040, on a vu que l'influence de la contrainte de réchauffement se fait sentir, en particulier plus elle est stricte. Si elle vaut $+1\text{ }^{\circ}\text{C}$, quelle que soit la valeur de la contrainte de rythme, les efforts doivent être poursuivis ; ainsi, avoir cherché à satisfaire une contrainte de rythme très stricte pendant la première moitié du siècle, n'entraîne pas un regret trop important (tout au plus aura-t-on avancé un peu trop les efforts). La valeur de l'information pour la deuxième moitié du siècle n'est donc pas aussi élevée que dans les autres cas. De plus, comme dans ce cas la contrainte de rythme ne s'exprime que pendant les premières décennies, une fois passé ce cap, avoir l'information sur la juste valeur de cette contrainte n'est plus aussi décisif ; la valeur de l'information croît donc très faiblement. Pour les autres valeurs de la contrainte sur l'amplitude du réchauffement, la même explication peut être avancée seulement le regret est plus important et ce d'autant plus que cette contrainte est lâche.

A nouveau, la sensibilité du climat accentuant le rythme de réchauffement et creusant l'écart entre les niveaux de stabilisation des concentrations et les seuils de réchauffement (voir Figure IV-12), on n'est pas surpris de voir la valeur de l'information sur l'objectif de long-terme croître selon ce paramètre et croître plus tôt.

En conclusion, on pu vérifier que l'incertitude sur les contraintes climatiques est particulièrement importante vis à vis de la décision : dans tous les cas, il serait souhaitable de connaître leur valeur avant 2050, en particulier pour la contrainte de rythme où dès 2030 la valeur de l'information a atteint au moins 50% de sa valeur à l'infini. Plus la sensibilité du climat

est élevée, plus la valeur de l'information associée aux contraintes est importante et plus elle croît (pour chaque degré en sensibilité, on avance de dix ans la valeur de l'information). On retrouve bien donc que la contrainte de rythme est une contrainte décisive à court-terme et la contrainte sur l'amplitude du réchauffement à long-terme et que ces caractéristiques sont renforcées par l'incertitude.

IV.4. Conclusion

En conclusion générale de cette section sur stratégie de précaution en présence d'incertitudes multiples et valeur de l'information, on a souhaité comparer nos différents résultats pour la sensibilité du climat, pour le rythme et le niveau critique de réchauffement : peut-on hiérarchiser ces incertitudes ?, comment évolue la valeur de l'information selon sa date d'arrivée ? Pour rendre ces situations comparables, nous prenons comme cas central la sensibilité du climat à $+3,5\text{ }^{\circ}\text{C}$, la contrainte sur l'amplitude du réchauffement à $+2\text{ }^{\circ}\text{C}$ et la contrainte sur le rythme du réchauffement à $0,2\text{ }^{\circ}\text{C.décennie}^{-1}$, et nous adoptons une croyance neutre.

Dans un premier temps, nous avons comparé les niveaux d'effort en 2010 (période de Kyoto) dans chacune des situations quand l'information arrive en 2010 et en 2060. Ces données sont encadrées par le cas central certain ($\theta_{2x} = +3,5\text{ }^{\circ}\text{C}$, $\Delta\theta_{MAX} = 2\text{ }^{\circ}\text{C}$ et $\Delta_{RYT} = 0,2\text{ }^{\circ}\text{C.décennie}^{-1}$) et par le pire des cas certains pour chaque situation : incertitude sur le climat, $\theta_{2x} = +4,5\text{ }^{\circ}\text{C}$, incertitude sur l'amplitude critique du réchauffement, $\Delta\theta_{MAX} = 1\text{ }^{\circ}\text{C}$ et incertitude sur le rythme critique de réchauffement, $\Delta_{RYT} = 0,1\text{ }^{\circ}\text{C.décennie}^{-1}$. Les résultats sont présentés au Tableau IV-3.

On peut constater que lorsque l'information arrive en 2010, la réponse optimale est presque confondue avec le pire des cas certains correspondant pour la contrainte de rythme et la sensibilité du climat mais confondue au contraire avec le cas central pour la contrainte d'amplitude. En 2060, toutes les réponses optimales sont (presque, voir pour la contrainte d'amplitude) confondues avec le pire des cas. La politique de précaution induit donc des efforts importants et en miroir, des regrets économiques significatifs.

Réponse optimale en 2010	Arrivée de l'information en...	
	2010	2060
<i>Cas central</i>		27
Incertitude sur la contrainte de rythme <i>Pire des cas certains correspondant : $\Delta_{RYT}=0,1\text{ C/déc}$</i>	55	55
Incertitude sur la contrainte d'amplitude <i>Pire des cas certains correspondant : $\Delta\theta_{MAX} = 1\text{ }^{\circ}\text{C}$</i>	27	31
Incertitude sur la sensibilité du climat <i>Pire des cas certains correspondant : $\theta_{2x} = +4,5\text{ }^{\circ}\text{C}$</i>	40	40

Tableau IV-3. Réponse optimale en 2010 pour différentes incertitudes et les cas certains correspondants.

Dans ce contexte, qu'en est-il pour les valeurs de l'information sur chacun de ces paramètres ? Les résultats sont présentés Figure IV-33.

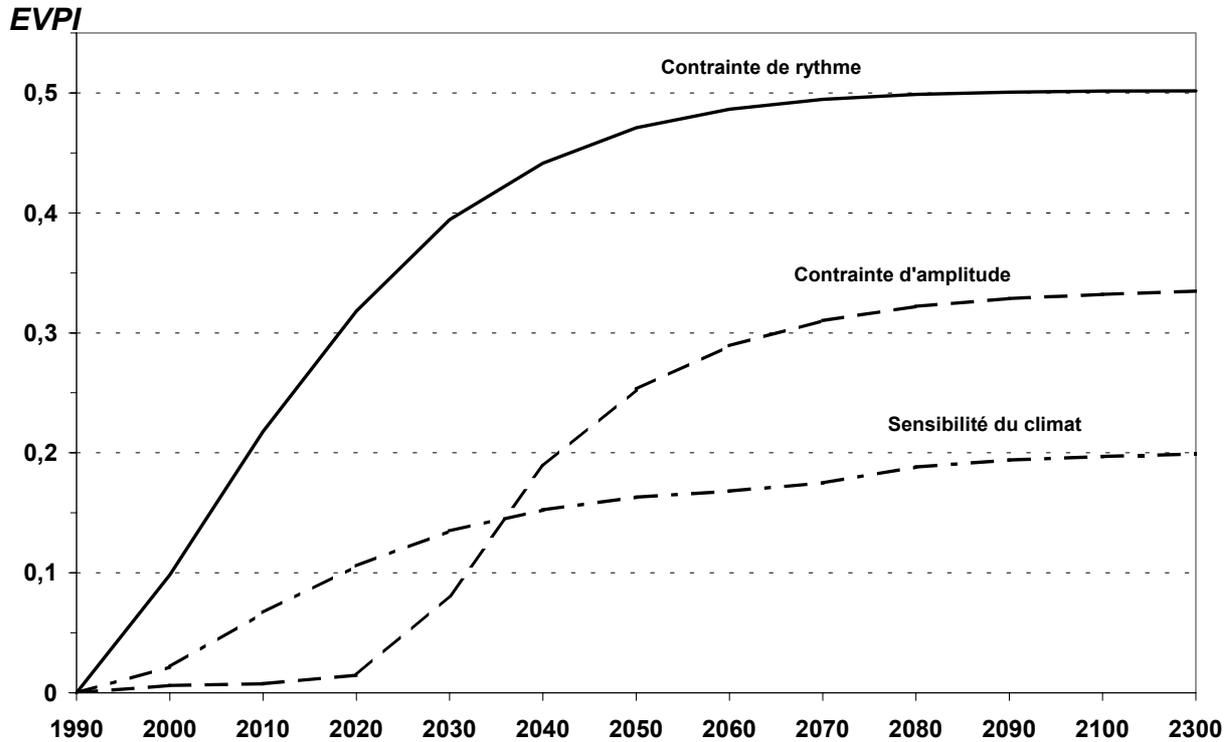


Figure IV-33. Valeur de l'information en fonction de sa date d'arrivée sur la sensibilité du climat, sur le rythme *critique* de réchauffement et sur le niveau *critique* de réchauffement.

On peut constater que c'est la contrainte de rythme à laquelle est associée la plus valeur forte de l'information : c'est elle dont la croissance est la plus rapide (plus de 60% en 2020 de la valeur à l'infini ; près de 90% en 2040, soit 20 ans plus tard) et dont le niveau à long-terme est le plus élevé (à peu près 2,5 fois supérieur à la valeur de l'information attachée à la sensibilité du climat et 1,5 fois supérieur à la valeur de l'information attachée à la contrainte sur l'amplitude du réchauffement).

Pour les deux autres paramètres, leurs dominances respectives changent : la valeur de l'information à propos de la sensibilité du climat est supérieure jusqu'en 2035 à celle associée à la contrainte sur l'amplitude du réchauffement et la situation s'inverse ensuite (en 2100, ces deux valeurs sont dans un rapport 1,7). Par rapport à son niveau à long-terme, la valeur de l'information sur la sensibilité du climat croît plus rapidement (en 2020, elle atteint déjà plus de 50% de sa valeur à l'infini) tandis que celle liée à l'amplitude du réchauffement croît très rapidement à partir de 2020 (en l'espace de 40 ans, de 2020 à 2060, elle croît de 80% de sa valeur à long-terme).

Ainsi, dans le cadre des hypothèses du modèle *REPOSE_Θ*, on trouve qu'en terme de gain de flexibilité, il y a une opportunité très importante à connaître dès avant 2040 les valeurs de la contrainte sur le rythme du réchauffement, de la sensibilité du climat et de la contrainte de long-terme, et à plus court-terme (entre maintenant et 2020) à connaître les deux premières. Au-delà de cette fenêtre d'opportunité, il y a bien sûr un gain pour la stratégie optimale à

découvrir les valeurs, avérées ou socialement souhaitables, de ces paramètres compte tenu des regrets importants qu'impose à plus long-terme une stratégie de précaution forte mais en termes de gains pour le niveau d'efforts à court-terme, l'acquisition d'information à ces périodes n'est plus aussi décisive (puisqu'on est obligé souvent de suivre une trajectoire proche, voire confondue, de la situation pire des cas certains).

Autrement dit, en termes d'encadrement des risques climatiques à partir d'indicateurs de l'évolution de la température moyenne globale et d'élaboration des politiques climatiques, les informations les plus cruciales pour les années à venir concerne le rythme critique de réchauffement socialement acceptable puis dans un second temps, les informations sur le niveau critique de changement climatique.

Conclusion

Pour évaluer les politiques climatiques dans un cadre coût-efficacité avec des contraintes formulées en termes d'amplitude du réchauffement moyen global et de son rythme décennal d'évolution, nous avons développé un module d'évolution de la température moyenne globale en réponse au forçage anthropique du climat induit par les émissions de GES. Ce module - intégré dans un modèle de contrôle optimal, *RESPONSE* - a été conçu de manière à mieux rendre compte de la réponse du climat à court-terme afin d'étudier les liens entre incertitude sur la sensibilité du climat et politique climatique de précaution.

Nos résultats montrent qu'il existe un coût d'opportunité élevé à connaître la valeur de la sensibilité du climat pendant la première moitié du XXI^{ème} siècle afin d'exploiter au mieux la flexibilité permise par cette information et tempérer dans une large mesure les regrets économiques significatifs (dépenses d'abattement *in fine* inutiles) qui accompagnent une politique de précaution en présence d'incertitude sur la sensibilité du climat. Or les perspectives d'apprentissage sur ce paramètre étant pour le moment relativement pessimistes (de l'ordre d'une cinquantaine d'années), les efforts à court-terme doivent être relativement importants. Ces résultats sont encore plus manifestes quand la contrainte sur le rythme critique de réchauffement ou la contrainte sur son amplitude à long-terme, voire les deux, sont strictes.

Ainsi, en passant d'une définition des risques climatiques à partir des niveaux de concentration atmosphériques de CO₂ et des plafonds de stabilisation souhaitables à une définition, plus tangible, à partir de l'évolution du climat, en terme de protection globale à long-terme (l'amplitude de réchauffement critique) et de protection transitoire (contrainte sur le rythme décennal critique de réchauffement), on trouve qu'une politique de précaution - même si l'objectif de long-terme en plafond de concentration ou en seuil de réchauffement est équivalent - implique plus d'efforts d'abattement à court-terme dès lors que la contrainte de rythme s'exprime, ce qui se produit, en présence d'incertitude sur la sensibilité du climat, dès qu'elle vaut 0,3 °C.décennie⁻¹. On montre d'ailleurs que c'est l'incertitude la plus importante à résoudre devant l'incertitude sur la sensibilité du climat et l'amplitude critique du réchauffement.

Ces résultats ont été obtenus dans un cadre coût-efficacité, dont nous avons souligné à plusieurs reprises le caractère fort contraignant pour la décision : quels que soient les états du monde (en particulier les plus défavorables), on doit systématiquement, quel qu'en soit le coût, respecter les contraintes climatiques. Or, comme l'avaient souligné [Hourcade, 1994], on peut penser

qu'il sera cependant préféré à un freinage violent des émissions au coût élevé un dépassement temporaire des contraintes environnementales. Il est donc nécessaire de dépasser un cadre d'analyse par trop normatif et c'est ce que nous allons faire à présent en retenant comme mesure des risques climatiques, au chapitre V, une préférence pour le régime climatique que nous connaissons actuellement qui donne naissance à un consentement à payer pour maintenir le climat en deçà d'un certain seuil de réchauffement et, au chapitre VI, cet indicateur idéal mais très incertain et très controversé que sont les fonctions de dommages.

Références bibliographiques

- Alcamo, J. et E. Kreileman (1996). Emissions scenarios and global climate protection, *Global Environmental Change*, 6 (4), 305-334.
- Alcamo, J., E. Kreileman, M. Krol, R. Leemans, J. Bollen, J. van Minnen, M. Schaeffer, S. Toet et B. de Vries (1998). Global modelling of environmental change: an overview of IMAGE 2.1, in *Global change scenarios of the 21st century: results from the IMAGE 2.1 Model*, J. Alcamo, R. Leemans et E. Kreileman (dir.), p 3-94, Pergamon/Elsevier Science, Oxford (UK).
- Andronova, N.G. et M.E. Schlesinger (2001). Objective estimation of the probability density function for climate sensitivity, *Journal of Geophysical Research*, 106 (D19), 22605-22611.
- Arrhenius, S. (1896). On the influence of carbonic acid in the air upon the temperature of the ground, *Philosophical Magazine*, 41 (251), 237-276.
- Berk, M., J. van Minnen, B. Metz et W. Moonaw (2001a). *Climate OptiOns for the Long term (COOL): Global dialogue synthesis report*, RIVM report n° 410200118, RIVM (National Institute of Public Health and the Environment), Bilthoven (the Netherlands).
- Berk, M., J. van Minnen, B. Metz et W. Moonaw (2001b). *Keeping our options open: A strategic vision on near-term implications of long-term climate policy option*, 38 p, RIVM - COOL Project, Bilthoven (the Netherlands).
- Caldeira, K., A.K. Jain et M.I. Hoffert (2003). Climate sensitivity uncertainty and the need for energy without CO₂ emission, *Science*, 299 (5615:28 March 2003), 2052-2054.
- den Elzen, M.G.J., M. Berk, S. Both, A. Faber et R. Oostemrijk (2000). *FAIR 1.0: An interactive model to explore options for differentiation of future commitments in international climate policy making*, RIVM report n° 728001013, RIVM (National Institute of Public Health and the Environment), Bilthoven (the Netherlands).
- den Elzen, M.G.J., M. Berk, M. Schaeffer, J. Olivier, C. Hendriks et B. Metz (1999). *The Brazilian proposal and other options for International Burden Sharing: an evaluation of methodological and policy aspects using FAIR*, RIVM report n° 728001011, RIVM (National Institute of Public Health and the Environment), Bilthoven (the Netherlands).
- European Commission (1996). Communication on Community Strategy on Climate change: Council Conclusions, European Commission, Brussels (Belgium).
- Eyre, N., T. Downing, R. Hoekstra, K. Remmings et R.S.J. Tol (1999). *ExternE (Externalities of Energy): Global Warming Damages*, Contract JOS3-C95-0002, European Commission: DG XII (Science, Research and Development).
- Forest, C.E., P.H. Stone, A.P. Sokolov, M.R. Allen et M.D. Webster (2002). Quantifying uncertainties in climate system properties with the use of recent climate observations, *Science*, 295 (5552), 113-117.
- Ha Duong, M., M. Grubb et J.C. Hourcade (1997). Influence of socioeconomic inertia and uncertainty on optimal CO₂-emission abatement, *Nature*, 390, 270-274.
- Hammit, J.K. (1999). Evaluation endpoints and climate policy: atmospheric stabilisation, benefit-cost analysis and near-term green-house gas emissions, *Climatic Change*, 41, 447-468.
- Hammit, J.K., R.J. Lempert et M.E. Schlesinger (1992). A sequential-decision strategy for abating climate change, *Nature*, 357, 315-318.

- Hoffert, M.I. et C. Covey (1992). Deriving global climate sensitivity from paleoclimate reconstructions, *Nature*, 360, 573-576.
- Houghton, J.T., Y. Ding, D.J. Griggs, P.J. Noguer, P.J. van der Linden, X. Dai, K. Maskell et C.A. Johnson (dir.) (2001). *Climate change 2001: the scientific basis. Contribution of Working Group I to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, Cambridge University Press, Cambridge (UK&US).
- Hourcade, J.C. (1994). No-regret potentials and technical innovation: a viability approach to integrative assessment of climate policies, in *Integrative assessment of mitigation, impacts and adaptation to climate change*, N. Nakicenovic, W. Nordhaus, R. Richels et F.L. Toth (dir.), p 535-558, IIASA, Laxenburg (Austria).
- Hourcade, J.C. et F. Ghersi (2002). The economics of a lost deal : Kyoto - The Hague - Marrakesh, *The Energy Journal*, 23 (3), 1-26.
- Kolstad, C.D. (1994). The timing of CO₂ control in the face of uncertainty and learning, in *International environmental economics*, E. van Ireland (dir.), Elsevier, Amsterdam (the Netherlands).
- Krause, F., W. Bach et J. Koomey (1989). *Energy policy in the greenhouse (Final report)*, International Project for Sustainable Energy Paths (IPSEP), El Cerrito (CA).
- Lecocq, F. (2000). *Distribution spatiale et temporelle des coûts des politiques publiques sous incertitudes: théorie et pratique dans le cas de l'effet de serre*, Thèse de Doctorat, Sciences de l'environnement, Ecole Nationale du Génie Rural, des Eaux et Forêts (ENGREF), Paris.
- Lecocq, F. et R. Crassous (2003). *International Climate Regime beyond 2012: Are Quota Allocation Rules Robust to Uncertainty?*, (# 3000), 39 p. Infrastructure and Environment, Development Research Group, the World Bank Group, Washington D.C.
- Leimbach, M., T. Bruckner, M. Fussel, A. Gritsevskii, G. Klepper, G. Petschel-Held, R. Sands, L. Schrattenholzer, K. Springer et F. Toth (2000). *ICLIPS-integrated assessment of climate protection strategies: Political and economic contributions*, 115 p, Potsdam-Institut für Klimafolgenforschung (PIK), Potsdam (Germany).
- Lempert, R.J., M.E. Schlesinger et J.K. Hammitt (1994). The impact of potential abrupt climate changes on near-term policy choices, *Climatic Change*, 24, 351-376.
- Lomborg, B. (2001). *The Skeptical Environmentalist: measuring the real state of the world*, 540 p, Cambridge University Press, Cambridge (UK&US).
- Manne, A.S. et R. Richels (1992). *Buying Greenhouse Insurance: The Economic Cost of CO₂ Emissions limits*, MIT Press, Cambridge (MA).
- McCarthy, J.J., O.F. Canziani, N.A. Leary, D.J. Dokken et K.S. White (dir.) (2001). *Climate Change 2001: Impacts, adaptation and vulnerability. Contribution of Working Group II to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, Cambridge University Press, Cambridge (UK & US).
- Mendelsohn, R., W. Morrison, M.E. Schlesinger et N.G. Andronova (1997). *Country-Specific Market Impacts of Climate Change*, crga.atmos.uiuc.edu/publications/market_impacts/text.html.
- Metz, B., D. Ogunlade, R. Swart et J. Pan (dir.) (2001). *Climate Change 2001: Mitigation. Contribution of Working Group III to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, Cambridge University Press, Cambridge (UK & US).
- Morgan, M.G. et D.W. Keith (1995). Subjective Judgments By Climate Experts, *Environmental Science & Technology*, 29, 468-476.
- Nakicenovic, N. (dir.) (2000). *Special Report on Emissions Scenarios: a special report of Working Group III of the Intergovernmental Panel on Climate change*, Cambridge University Press, Cambridge (UK&US).

- Nordhaus, W. et J.G. Boyer (2000). *Warming the world: Economics models of Climate Change*, 246 p, MIT Press, Cambridge (MA, USA).
- Parry, M., N. Arnell, M. T., R. Nicholls, P. Martens, S. Kovats, M. Livermore, C. Rosenzweig, A. Iglesias et G. Fischer (2001). Millions at Risk: defining critical climate change threats and targets, *Global Environmental Change*, 11, 181-183.
- Petschel-Held, G., H.-J. Schellnhuber, T. Bruckner, F.L. Toth et K. Hasselmann (1999). The Tolerable Windows Approach: theoretical and methodological foundations, *Climatic Change*, 41 (3/4), 303-331.
- Schelling, T.C. (1992). Some economics of global warming, *American Economic Review*, 82 (1), 1-14.
- Schlesinger, M.E. et N.G. Andronova (2000). Climate sensitivity, in *The Earth system: physical and chemical dimensions of global environmental change*, M.C. MacCracken et J.S. Perry (dir.), p 301-308, John Wiley and sons.
- Schneider, S.H. et S.L. Thompson (1981). Atmospheric CO₂ and climate: importance of the transient response, *Journal of Geophysical Research*, 86, 3135-3147.
- Simonett, O. (1989). *Potential impacts of global warming: cases studies on climatic change*, GRID-Geneva, Geneva (Switzerland).
- Swart, R., M. Berk, M. Janssen, E. Kreileman et R. Leemans (1998). The safe landing approach: risks and trade-offs in climate change, in *Global change scenarios of the 21st century: results from the IMAGE 2.1 Model*, J. Alcamo, R. Leemans et E. Kreileman (dir.), p 193-218, Pergamon/Elsevier Science, Oxford (UK).
- the IMAGE team (2001). *The IMAGE 2.2 implementation of the SRES scenarios*, CDrom.
- the National Academies (2003). *Estimating Climate Sensitivity: Report of a workshop*, 41 p, Steering committee on Probabilistic Estimates of Climate Sensitivity, Board on Atmospheric Sciences and Climate, Division of Earth and Life Studies, the National Academies, Washington D.C.
- Toth, F.L., T. Bruckner, H.-M. Fussel, M. Leimbach, G. Petschel-Held et H.-J. Schellnhuber (1997). The tolerable windows approach to integrated assessment, in *Climate Change and Integrated Assessment Models: Bridging the gaps*, O.K. Cameron, K. Fukuwatari et T. Morita (dir.), p 401-430, National Institute for Environmental Studies, Tsukuba (Japan).
- Tuinstra, W., M. Berk, M. Hisschemöller, L. Hordijk, B. Metz et A.P.J. Mol (2002). *Climate OptiOns for the Long-term (COOL) - Synthesis Report*, Report n° 410 200 115, Wageningen University, Wageningen (the Netherlands).
- UNFCCC (1992). Convention-cadre des Nations Unies sur les changements climatiques (UNFCCC).
- Webster, M., C. Forest, J.M. Reilly, M.H. Babiker, D. Kicklighter, M. Mayer, R.G. Prinn, M. Sarofim, A. Sokolov, P. Stone et C. Wang (2002). *Uncertainty analysis of climate change and policy response*, 21 p, MIT report # 95, MIT Joint Program on the Science and Policy of Climate Change, Cambridge (MA).
- Weyant, J. (dir.) (1999). *The costs of the Kyoto Protocol: a multi-model evaluation*, Special Issue of the *Energy Journal* (vol 20).
- Wigley, T.M.L., R. Richels et J.A. Edmonds (1996). Economic and environmental choices in the stabilization of atmospheric CO₂ concentrations, *Nature*, 379, 240-243.
- WWF (2000). *Global Warming and Terrestrial Biodiversity Decline*, World Wide Fund for Nature (WWF), Gland (Switzerland).

Chapitre V

Préférence pour la stabilité du climat
et politiques climatiques :
Leçons du modèle RESPONSE_II

CHAPITRE V PREFERENCE POUR LA STABILITE DU CLIMAT ET POLITIQUES CLIMATIQUES : LEÇONS DU MODELE *RESPONSE_Π*.....241

I. Du coût-efficacité au coût-bénéfice : prise en compte d'une préférence pour la stabilité du climat.....246

 I.1. Prolongation du scénario de croissance de référence du modèle *RESPONSE_Π*247

 I.1.1 Profil démographique 247

 I.1.2 Sentier de croissance du revenu 247

 I.1.3 Trajectoires d'émissions de CO₂ 248

 I.2. Une fonction d'utilité pour traduire la préférence pour la stabilité du régime climatique actuel.....248

 I.2.1 Consentement à payer pour préserver la qualité du climat et élasticité de substitution entre les deux biens 249

 I.2.2 Calibrage de la fonction d'utilité et analyse de sensibilité du consentement à payer 251

II. *RESPONSE_Π*: un modèle coût-bénéfice d'optimisation inter-temporelle des politiques climatiques, en présence d'une 'Préférence pour la stabilité du climat'257

 II.1. Trajectoires d'émissions en mode coût-efficacité et coût-bénéfice : résultats des modèles *RESPONSE*.....258

 II.2. Trajectoires d'émissions en mode coût-efficacité et coût-bénéfice : un modèle analytique262

 II.2.1 Approche coût-efficacité..... 262

 II.2.2 Approche coût-bénéfice 268

III. Incertitudes sur la dynamique du climat, croyances sur les risques climatiques et analyse coût-bénéfice des politiques climatiques270

 III.1. Politiques climatiques et incertitudes sur le climat : résultats du modèle *RESPONSE_Π*271

 III.2. Politiques climatiques et croyances sur les risques climatiques : résultats du modèle *RESPONSE_Π*279

IV. De la 'Préférence pour la stabilité du climat' aux aménités prodiguées par l'environnement que menace le changement climatique : réalité des dommages et substituabilité des dommages marchands et non-marchands.....285

 IV.1. Deux biens menacés de manière différente par le changement climatique285

 IV.2. Un modèle intégré coût-bénéfice avec deux types d'impacts du changement climatique.....286

Conclusion291

Références bibliographiques.....293

Table des figures

Figure V-1. Analyse coût-efficacité et politique climatique optimale. 252

Figure V-2. Analyse coût-bénéfice et politique climatique optimale. 253

Figure V-3. Analyse de sensibilité du consentement à payer selon les résultats du calibrage. 256

Figure V-4. Amplitude du réchauffement moyen global pour 3 valeurs de la sensibilité du climat. 260

Figure V-5. Coûts d'abattement pour 3 valeurs de la sensibilité du climat. 261

Figure V-6. Représentation graphique de la solution du programme coût-efficacité. 264

Figure V-7. Déplacement de la solution optimale du programme coût-efficacité pour une valeur plus faible du facteur d'actualisation. 266

Figure V-8. Déplacement de la solution optimale du programme coût-efficacité pour une valeur plus contraignante (plus faible) du plafond de concentration.....	267
Figure V-9. Croyances sur les risques climatiques et incertitudes sur la sensibilité du climat.	271
Figure V-10. Politique climatique optimale en présence d'incertitude sur la sensibilité du climat.	274
Figure V-11. Comme pour la Figure V-10 mais avec des croyances optimistes (en haut) et pessimistes (en bas)..	275
Figure V-12. Valeur de l'information sur la sensibilité du climat en fonction de sa date d'arrivée pour différentes croyances sur ce paramètre.....	278
Figure V-13. Politique climatique optimale en présence d'incertitude sur les préférences de la population vis à vis du climat.....	281
Figure V-14. Comme pour la Figure V-13 mais avec des croyances optimistes (en haut) et pessimistes (en bas)..	282
Figure V-15. Valeur de l'information sur l'élasticité climat de la fonction d'utilité (β) en fonction de sa date d'arrivée pour différentes croyances sur ce paramètre.	283
Figure V-16. Procédure de calibrage des paramètres de la fonction d'utilité et de la fonction de dommage.....	288
Figure V-17. Politique climatique optimale pour différents partages des impacts du changement climatique, entre consommation et aménités du climat.	291

Table des encadrés

Encadré V-1. <i>RESPONSE_II</i> : un modèle coût-bénéfice de recherche de politique climatique optimale en présence d'une 'Préférence pour la stabilité du climat'.	258
Encadré V-2. Politiques climatiques de précaution en présence d'incertitude sur la sensibilité du climat : évaluation à l'aide du modèle coût-bénéfice <i>RESPONSE_II</i>	272
Encadré V-3. Politiques climatiques de précaution en présence d'incertitude sur les préférences de la population vis à vis du climat : évaluation à l'aide du modèle <i>RESPONSE_II</i>	280
Encadré V-4. Politique climatique optimale et catégories d'impacts du changement climatique : évaluation à l'aide du modèle coût-bénéfice <i>RESPONSE_II</i>	290

Table des tableaux

Tableau V-1. Valeurs de l'élasticité climat de la fonction d'utilité (β) selon la sensibilité du climat et la préférence pure pour le présent.	255
---	-----

Le chapitre précédent se conclut sur les recommandations finalement très contraignantes (au moins à court-terme) auxquelles aboutit un cadre d'analyse des politiques climatiques de type coût-efficacité. En effet, en présence d'incertitude sur la sensibilité du climat ou sur le niveau ou le rythme critiques de réchauffement, on observe une attraction de la trajectoire optimale d'émissions par le pire des cas certains car le formalisme coût-efficacité impose de satisfaire les contraintes environnementales, même les plus strictes, quel qu'en soit le coût. Cette attraction est d'autant plus prononcée que les incertitudes sont réduites tardivement et elle s'accompagne de regrets économiques croissants. Dans un tel contexte, une stratégie de précaution implique ainsi des efforts d'abattement importants, notamment à court-terme. En revenant à l'interprétation des probabilités subjectives que nous avons employées comme des fractions de la population arguant pour un seuil de réchauffement donné ou rythme critique de réchauffement donné, on assiste donc à une dictature du groupe le plus exigeant (qu'il soit très averse au risque, très préoccupé par les risques pour les écosystèmes ou les régions les plus vulnérables), même s'il ne représente qu'une mince frange de la population.

Compte tenu de ces très fortes pressions sur la trajectoire optimale d'émissions à court-terme, on peut se demander dans quelle mesure, autoriser un dépassement temporaire des contraintes environnementales ne permettrait pas de relâcher quelque peu les efforts d'abattement (en particulier sur les prochaines décennies) pour exploiter par là un gisement d'efficacité dans l'allocation inter-temporelle des réductions d'émissions et échapper à l'oukase environnementale. Pour ce faire, on doit se doter d'une mesure des bénéfices des politiques climatiques qui permette d'évaluer l'arbitrage entre variations du bien-être provenant d'un relâchement (renforcement) à la marge des efforts de protection de l'atmosphère et du climat et d'une dégradation (amélioration) à la marge de ces derniers. C'est à dire que l'on abandonne les cadres d'analyse de type coût-efficacité, trop rigides, pour des cadres d'analyse coût-bénéfice. Pour ce chapitre, nous ne retiendrons pas encore comme mesure des bénéfices des politiques climatiques les niveaux de dommages résultant de tel ou tel scénario d'émissions mais un indicateur plus en amont le long de la chaîne causale qui va des émissions aux dommages (voir chap. I, Figure I-8), une préférence pour la stabilité du régime climatique que nous connaissons actuellement et le consentement à payer pour éviter de trop s'en écarter, à laquelle cette préférence donne naissance.

Dans une première section, nous présentons les modalités du choix d'une telle mesure et sa signification puis la fonction d'utilité que nous employons pour la traduire, une fonction d'utilité à deux biens : un bien composite, regroupant toute la production marchande et jouant le rôle de bien numéraire, et un bien environnemental, la qualité du climat et toutes les préférences qui s'y rattachent. Cette section se conclut par la procédure de calibrage suivie pour révéler le consentement à payer pour éviter un réchauffement d'une amplitude donnée. Une deuxième section est consacrée aux résultats du modèle *RESPONSE_II*, modèle coût-bénéfice d'évaluation intégrée des politiques climatiques. Nous y comparons les trajectoires optimales d'émissions quand on passe d'un cadre coût-efficacité (résultats du modèle *RESPONSE_Θ*) à un cadre coût-bénéfice (résultats du modèle *RESPONSE_II*). Cette analyse se complète, dans une troisième section, par l'examen des recommandations du modèle *RESPONSE_II*, d'abord en présence d'incertitude sur la dynamique du climat puis dans un contexte où les croyances sur les risques climatiques impliquent des consentements à payer contrastés pour protéger le climat. Enfin, dans une quatrième section, nous revenons sur un plan davantage théorique, pour évaluer dans quelle mesure représenter explicitement comment les impacts du changement climatique sont supportés d'un côté, par la production marchande et de l'autre, par l'environnement, comme source d'aménités, modifie la trajectoire optimale d'émissions par

rapport à une situation où l'on s'en tient à une évaluation agrégée des impacts, retirée uniquement du revenu.

I. Du coût-efficacité au coût-bénéfice : prise en compte d'une préférence pour la stabilité du climat

A partir de ce chapitre, on quitte les approches des risques climatiques au moyen de contraintes, où ils sont encadrés de manière binaire sur la base d'indicateurs plus ou moins élaborés des impacts, pour entrer dans l'univers de la valorisation explicite des bénéfices des politiques climatiques, où peuvent être représentées et évaluées les conséquences sur le bien-être d'une séquence de décisions de réduction des émissions donnée. On peut définir en effet complètement les bénéfices des politiques climatiques, entre variation de bien-être résultant d'une protection accrue de l'atmosphère et du climat (les dommages évités) et variation de bien-être imputable aux coûts de mise en œuvre des politiques pour atteindre un tel niveau de protection (les coûts de mitigation, dans leur acception la plus générale).

Pourquoi une préférence ?

Dans un contexte où les estimations des impacts du changement climatique et de leurs répercussions socio-économiques restent encore très incertaines, une première tentative de valorisation des bénéfices des politiques climatiques peut passer par la formulation et l'estimation d'une préférence pour la stabilité du régime climatique que nous connaissons aujourd'hui.

Compte tenu de l'océan d'incertitude dans lequel nous nous trouvons, il est absolument impossible de juger si tel régime climatique serait plus souhaitable que tel autre car cela nous renvoie à l'investigation région par région et secteur par secteur des impacts et de leurs répercussions sur le bien-être, ce qui est pour le moment un exercice hors de portée.

Pour autant, le peu d'informations dont nous disposons :

- laissent croire à un accroissement des risques avec l'amplitude du réchauffement à l'échelle globale, à des degrés divers selon les préoccupations de chacun (voir chap. I, Figure I-1),
- pointent l'éventualité de chocs significatifs (au moins à une échelle régionale) pour les activités économiques et les implantations humaines (pénurie d'eau, submersion des territoires insulaires de faible élévation, désorganisation des économies régionales à la suite d'un choc négatif sur les productions agricoles),
- soulignent les coûts supportés pour les prochaines décennies pendant que s'accomplit la transition du système climatique, et ce même si le régime climatique stabilisé peut sembler à bien des égards plus favorable.

Autant d'éléments qui mettent en avant les risques de s'écarter du régime climatique actuel, ni meilleur ni pire qu'un autre mais auquel nous sommes à peu près adaptés. Selon notre degré d'information sur les menaces potentielles du changement climatique, selon nos préférences effectives pour un régime climatique donné ou les aménités environnementales, selon nos préoccupations face aux conséquences d'une rupture du milieu (voir chap. I § I.3.1), selon notre attitude face au risque, nous pouvons exprimer un consentement à payer pour que le système climatique ne s'aventure pas au-delà d'une certaine limite. On retrouve des

considérations du chapitre précédent (où à partir d'un jugement de valeur sur les impacts, incluant le degré d'aversion au risque, on s'accorde pour dire que tel niveau de changement climatique est dangereux) mais ici, on classe ces différents seuils de danger en leur associant une valeur, le consentement à payer pour ne pas les franchir. En définitive, ce n'est pas tant une préférence pour un niveau de changement climatique donné que nous utilisons (une approche *bottom-up* des dommages, qui s'appuierait sur des évaluations robustes) mais une préférence pour la stabilité du système climatique (une approche *top-down*, qui s'appuie sur l'attitude face au risque). Cette préférence se traduit par un consentement à payer croissant avec l'amplitude du réchauffement.

Pour le représenter, nous retenons une fonction d'utilité à deux biens : un bien composite, qui représente le niveau de production agrégée auquel sont soustraits les coûts d'abattement, et un bien environnement, la qualité du climat, dont un indicateur simple est l'élévation de la température moyenne globale en réponse aux émissions de GES. Cette fonction d'utilité est introduite dans le modèle *RESPONSE_Π*, un modèle d'optimisation inter-temporelle des politiques de réduction des émissions, résolu en mode coût-bénéfice.

I.1. Prolongation du scénario de croissance de référence du modèle *RESPONSE_Π*

Avant d'entrer plus en détail dans la présentation de la fonction d'utilité à deux biens du modèle *RESPONSE_Π*, nous consacrons une brève section aux hypothèses utilisées pour prolonger le scénario A1 (population mondiale, sentier de croissance du revenu et trajectoires d'émissions) au-delà de 2100, jusqu'en 2300 (horizon du modèle).

I.1.1 Profil démographique

Nous faisons l'hypothèse que la population mondiale se stabilise à 6 milliards d'individus, ce qui correspond aux tendances de la variante basse du scénario de l'IIASA sur lequel s'appuie le scénario démographique de la famille SRES A1 (voir chap. II § I.1.1.4). Ce niveau est atteint rapidement, dès 2130.

I.1.2 Sentier de croissance du revenu

Pour prolonger le sentier de croissance du revenu, nous nous intéressons au revenu *per capita*. En faisant l'hypothèse d'un taux d'épargne constant (fixé à 20% dans le modèle *RESPONSE_Π*), on sait qu'à long-terme le revenu *per capita* croît au rythme du progrès technique exogène (cf. [Aghion et Howitt, 2000], chap. I). Soit g_t le taux de croissance décennal du revenu *per capita* (pib); on cherche à ajuster une relation de la forme suivante sur les données du scénario A1 (à partir de 2020, où s'amorce la convergence) :

$$g_t = \frac{pib_{t+1}}{pib_t} = \alpha e^{-\beta(t-t_0)} + \lim_{PT}$$

où g_t : taux de croissance du revenu *per capita* pendant la décennie $[t; t+10]$
 \lim_{PT} : taux de croissance asymptotique du revenu *per capita* (effet du progrès technique exogène) (%.*décennie*⁻¹)
 α, β : paramètres de convergence de g_t vers sa limite

t_0 : date initiale (2020).

On trouve les valeurs suivantes : $lim_{rr} = 1,17 \text{ \%.décennie}^{-1}$ (c'est à dire une amélioration annuelle de la productivité générale des facteurs de 1,58 %) ; $\alpha = 0,27 \text{ \%.décennie}^{-1}$ et $\beta = 0,017 \text{ an}^{-1}$.

Partant, le scénario de croissance du revenu est obtenu en multipliant à chaque date la population par le revenu *per capita*.

I.1.3 Trajectoires d'émissions de CO₂

Enfin, pour prolonger les émissions de CO₂, nous partons de la relation suivante (voir [Lecocq, 2000], chap 1.) qui met en rapport le taux de croissance décennal des émissions et celui du revenu, en tenant compte d'une tendance autonome à la baisse des émissions, sous l'effet conjugué d'une amélioration de l'intensité énergétique du PIB et d'une décroissance du contenu carbone des ressources énergétiques :

$$\frac{1}{t-t_0} \ln\left(\frac{E_t}{E_{t_0}}\right) = \ln\left[1 - \alpha e^{\beta(t-t_0)} \frac{1}{t-t_0} \ln\left(\frac{PIB_t}{PIB_{t_0}}\right)\right]$$

où E : émissions de CO₂ à la date t (GtC)
 PIB_t : niveau du revenu à la date t (10^{12} US\$)
 α, β : paramètres de la tendance autonome à la baisse de l'intensité carbone du PIB
 t_0 : date initiale (2050).

Cette relation est ajustée sur les données du scénario SRES A1 (à partir de 2050, où s'amorce la décroissance globale des émissions). On trouve les valeurs $\alpha = 0,0517$ et $\beta = 0,0253 \text{ an}^{-1}$. Les émissions prolongées poursuivent leur décroissance au-delà de 2100, elles sont inférieures à 5 GtC.an⁻¹ dès 2050, à 1 GtC.an⁻¹ en 2180 et pratiquement nulles en 2200. Elles correspondent à un volume de carbone total émis de 2077 GtC (soit plus de 2,7 fois le contenu carbone de l'atmosphère en 1990).

I.2. Une fonction d'utilité pour traduire la préférence pour la stabilité du régime climatique actuel

C'est au moyen de la fonction d'utilité suivante que nous exprimons cette préférence et le consentement à payer à laquelle elle donne naissance :

$$U(C, \theta) = \ln(C) \cdot (\bar{\theta} - \theta)^\beta$$

avec $0 < C < 1$, $0 < \theta < \bar{\theta}$ et $0 < \beta < 1$.

C : consommation privée (*per capita*) d'un bien composite agrégé de tous les types de productions marchandes (telles que prises en compte dans la comptabilité nationale) ; ce bien sert de bien numéraire.

θ : amplitude du réchauffement moyen global depuis 1990. $\bar{\theta}$ représente un seuil absolu de réchauffement au delà duquel le changement climatique est perçu comme indubitablement *dangereux*, en ce sens qu'il engendre des perturbations

graves des mécanismes du climat, des écosystèmes et des menaces sur les implantations humaines et les activités productives. Ce paramètre est fixé à +4°C, en gardant à l'esprit qu'un tel réchauffement à l'échelle globale, impliquerait aux échelles régionales (en particulier les superficies continentales de l'hémisphère Nord) des chocs climatiques particulièrement significatifs¹. La *qualité* du climat est ainsi une fonction décroissante de l'amplitude du réchauffement : elle décroît linéairement de $\bar{\theta}$ quand θ vaut 0 à 0 quand θ vaut $\bar{\theta}$. β est l'élasticité de la fonction d'utilité vis à vis de la qualité du climat.

Cette fonction d'utilité vérifie les propriétés suivantes :

utilité marginale décroissante de la consommation

$$\frac{\partial U(C, \theta)}{\partial C} = \frac{(\bar{\theta} - \theta)^\beta}{C} > 0$$

$$\frac{\partial^2 U(C, \theta)}{\partial C^2} = -\frac{(\bar{\theta} - \theta)^\beta}{C^2} < 0$$

L'utilité marginale de la consommation est affectée négativement par l'amplitude du réchauffement : plus celle-ci est élevée, plus l'utilité marginale du revenu est faible,

$$\frac{\partial^2 U(C, \theta)}{\partial \theta \partial C} = -\beta \frac{(\bar{\theta} - \theta)^{\beta-1}}{C} < 0.$$

désutilité marginale croissante du réchauffement

$$\frac{\partial U(C, \theta)}{\partial \theta} = -\beta \ln C \cdot (\bar{\theta} - \theta)^{\beta-1} < 0$$

$$\frac{\partial^2 U(C, \theta)}{\partial \theta^2} = \beta (\beta - 1) \ln C \cdot (\bar{\theta} - \theta)^{\beta-2} < 0$$

Autrement dit, plus l'amplitude du réchauffement est importante, plus la perte d'utilité (à revenu donné) est élevée et cette perte croît de plus en plus quand l'amplitude du réchauffement croît (on se rapproche de $\bar{\theta}$).

I.2.1 Consentement à payer pour préserver la qualité du climat et élasticité de substitution entre les deux biens

Intéressons-nous dans un premier temps à la manière dont est valorisé un changement de climat d'amplitude donnée et comment cette valeur évolue selon le revenu ou le niveau de réchauffement, en étudiant le consentement à payer (CAP) pour éviter un tel réchauffement.

On prend comme référence un scénario *business as usual*, en faisant l'hypothèse que le sentier de croissance n'est pas affecté par les impacts du changement climatique (c'est cette démarche qui est suivie, nous l'avons vu au chapitre I, pour toutes les évaluations d'impacts et de dommages). Dans cette situation, le revenu est C et l'amplitude du réchauffement θ . Le

¹De l'ordre de quelques +6°C par exemple sur une grande partie de la Russie, l'Asie centrale, le Canada et le Nord des Etats-Unis (cf. par exemple les résultats régionalisés des projections des scénarios A2 et B2, [Houghton et al., 2001] chap. IX, pp. 546 et sq.)

montant maximum, $CAP(C, \theta)$, qu'un individu est prêt à dépenser pour éviter un changement climatique de cette amplitude est donné par :

$$U(C, \theta) = U(C - CAP(C, \theta), 0)$$

$$\ln(C) \cdot (\bar{\theta} - \theta)^\beta = \ln(C - CAP(C, \theta)) \cdot (\bar{\theta})^\beta$$

Il vient :

$$CAP(C, \theta) = C - C \left(\frac{\bar{\theta} - \theta}{\bar{\theta}} \right)^\beta = C \left(1 - \left(\frac{\bar{\theta} - \theta}{\bar{\theta}} \right)^\beta \right)$$

Pour une amélioration de la qualité du climat, on trouve bien que $CAP(C, \theta)$ est positif et est

$$\text{compris entre 0 et 100\% du revenu car } \begin{cases} 0 < \theta < \bar{\theta} \\ 0 < \beta < 1 \end{cases} \Rightarrow 0 < \left(\frac{\bar{\theta} - \theta}{\bar{\theta}} \right)^\beta < 1$$

$$\text{et } \begin{cases} 1 < C \\ \left(\frac{\bar{\theta} - \theta}{\bar{\theta}} \right)^\beta - 1 < 0 \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} 0 < C \left(\frac{\bar{\theta} - \theta}{\bar{\theta}} \right)^\beta < 1 \\ 0 < 1 - C \left(\frac{\bar{\theta} - \theta}{\bar{\theta}} \right)^\beta < 1 \end{cases} \Rightarrow 0 < CAP(C, \theta) = C \left(1 - \left(\frac{\bar{\theta} - \theta}{\bar{\theta}} \right)^\beta \right) < C.$$

$CAP(C, \theta)$ tend vers $C-1$ quand θ tend vers $\bar{\theta}$ et vers 0 quand θ tend vers 0 (*statu quo*).

Dans ces conditions, comment varie $CAP(C, \theta)$ selon l'amplitude du réchauffement et le niveau de revenu ? On trouve :

$$\frac{\partial CAP(C, \theta)}{\partial \theta} = \frac{\beta \ln C}{\bar{\theta}} \left(\frac{\bar{\theta} - \theta}{\bar{\theta}} \right)^{\beta-1} C \left(\frac{\bar{\theta} - \theta}{\bar{\theta}} \right)^\beta > 0$$

Autrement dit, $CAP(C, \theta)$ est une fonction croissante de l'amplitude du réchauffement ; ce qui correspond à nos hypothèses : plus l'amplitude du réchauffement projeté est significative, plus la crainte et les peurs du changement climatique sont importantes et se traduisent par un consentement à payer plus important pour protéger l'atmosphère et le système climatique.

Examinons dans un second temps comment varie le consentement à payer en fonction du revenu. On trouve :

$$\frac{\partial CAP(C, \theta)}{\partial C} = 1 - \left(\frac{\bar{\theta} - \theta}{\bar{\theta}} \right)^\beta C \left(\frac{\bar{\theta} - \theta}{\bar{\theta}} \right)^{\beta-1} > 0$$

$$\text{car } \begin{cases} 0 < \left(\frac{\bar{\theta} - \theta}{\bar{\theta}} \right)^\beta < 1 \\ C > 1 \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} 0 < C \left(\frac{\bar{\theta} - \theta}{\bar{\theta}} \right)^\beta < 1 \\ 0 < \left(\frac{\bar{\theta} - \theta}{\bar{\theta}} \right)^\beta C \left(\frac{\bar{\theta} - \theta}{\bar{\theta}} \right)^{\beta-1} < \left(\frac{\bar{\theta} - \theta}{\bar{\theta}} \right)^\beta < 1 \end{cases} \Rightarrow 1 - \left(\frac{\bar{\theta} - \theta}{\bar{\theta}} \right)^\beta C \left(\frac{\bar{\theta} - \theta}{\bar{\theta}} \right)^{\beta-1} > 0.$$

Autrement dit le consentement à payer pour une amélioration de la qualité du climat croît avec le revenu. Croît-il plus vite (bien supérieur), moins vite (bien de nécessité) ou au même rythme (bien normal) que le revenu ? Pour ce faire, examinons comment varie en fonction du revenu, $\pi(\theta)$, le ratio entre consentement à payer et revenu. On trouve :

$$\frac{\partial \pi(\theta)}{\partial C} = \left(1 - \left(\frac{\bar{\theta} - \theta}{\bar{\theta}} \right)^\beta \right) C \left(\frac{\bar{\theta} - \theta}{\bar{\theta}} \right)^{\beta-2} > 0 \text{ (pour les mêmes raisons que } \textit{supra}\text{)}.$$

C'est à dire que $\pi(\theta)$ est une fonction croissante du revenu, autrement dit la qualité du climat est un bien supérieur². Les générations futures, qui seront plus riches que nous dans le scénario de référence, seront donc prêtes à consacrer une part croissante de leur revenu à la protection du climat, à la fois parce que la qualité du climat se dégrade (θ croît) et parce qu'il s'agit d'un bien supérieur.

I.2.2 Calibrage de la fonction d'utilité et analyse de sensibilité du consentement à payer

Il n'existe pas bien sûr d'évaluations d'une telle « Préférence pour la stabilité du climat » (encore moins à une échelle agrégée)³. Seraient-elles disponibles d'ailleurs qu'elles seraient très dépendantes – au delà des différences sociales, culturelles, financières derrière les préférences de chacun – de l'actualité météorologique récente, de l'agenda politique et social, de la manière dont les media s'en font l'écho, toutes choses qui participent à élaborer nos perceptions des risques climatiques en l'absence d'un tableau clair sur ce point (voir *infra*, chap. II).

En l'absence de données, plutôt que recourir à des chiffres arbitraires, une solution est de chercher à révéler quelle fonction d'utilité correspond aux valeurs des seuils de réchauffement que nous avons précédemment explorés. Cette démarche est d'autant plus justifiée que dans cette thèse, on se propose de comparer entre elles les recommandations issues de différents cadres d'analyse de la décision et de déterminer quelles croyances sur les risques sont cohérentes avec une attitude donnée (agir ou attendre).

Pour ce faire, on va repartir des analyses coût-efficacité du chapitre précédent, où l'on a recherché la trajectoire des réductions d'émissions qui minimise le coût inter-temporel de respect d'une jeu de contraintes environnementales. Ici, on ne s'intéresse qu'au niveau critique de réchauffement (et non pas à son rythme). On se rappelle que cette contrainte est fixée par un planificateur bienveillant qui prend en compte d'une part, nos inquiétudes face au risque climatique et ce qui nous semble une évolution dangereuse de la machine climatique et d'autre part, nos bilans implicites coût-bénéfice (qui participent également à la définition d'un risque socialement acceptable). Autrement dit, en retenant un seuil de réchauffement, comme +2°C par exemple, le planificateur résume un ensemble d'éléments sur ce qui constitue un changement climatique dangereux (seuil dangereux pour les récifs coralliens, seuil dangereux pour les écosystèmes arctiques et montagnards, seuil dangereux pour les régions vulnérables, *etc.*), sur les arbitrages entre régions ou catégories d'impacts, sur les liens de solidarité avec les générations futures, sur les perspectives de croissance, les volumes d'émissions et les coûts, sur la dynamique du climat.

² Dans la littérature sur les impacts du changement climatique, on rencontre souvent une telle hypothèse : on y fait de la préservation des écosystèmes menacés [Tol, 1999] ou des préoccupations face aux menaces du changement climatique [Manne et al., 1995; Nordhaus et Boyer, 2000] un bien supérieur. La nature des préférences environnementales des individus et de leur lien avec le niveau de revenu est cependant loin de faire l'objet d'un consensus au sein de la communauté (voir [Kristrom et Riera, 1996; Pearce, 1980] pour une revue et une critique).

³ Certes, il existe bien des estimations des valeurs d'aménités dérivées du climat (voir chap. I § I.3.1) mais on ne peut les interpréter comme un reflet des 'Préférences pour la stabilité du climat' qui incluent bien d'autres composantes.

C'est ce qui est représenté Figure V-1, dans un contexte légèrement différent du modèle *RESPONSE_Θ* du chapitre précédent, puisque l'objectif du planificateur est ici de maximiser l'utilité inter-temporelle des générations successives et non plus de minimiser la somme actualisée des coûts d'abattement. Cette modification est introduite aux fins du calibrage pour assurer la cohérence de la prise en compte de l'équité intergénérationnelle par une même préférence pure pour le présent et ne pas avoir d'un côté un taux d'actualisation *constant* (calculs en analyse coût-efficacité, au chapitre précédent) et de l'autre un taux d'actualisation *variable* résultant de la préférence pure pour le présent, des perspectives de croissance, des préférences pour le revenu et le régime climatique (analyse coût-bénéfice, ce chapitre). Dans le modèle représenté très simplement à la Figure V-1, le planificateur recherche la séquence d'efforts d'abattement qui maximise l'utilité inter-temporelle de la consommation *per capita* nette des coûts de réduction des émissions. Pour rester dans une situation comparable avec les analyses coût-efficacité du chapitre précédent, on ne suit que l'utilité de la consommation. La fonction d'utilité est le logarithme népérien. On fait l'hypothèse que les coûts d'abattements sont soustraits à chaque période à la consommation et l'investissement dans une proportion identique à celle du scénario de référence (ici, propension à consommer, *c*, constante, égale à 0,8) et que le revenu est réparti uniformément au sein de la population à chaque période. Dans l'objectif du planificateur, chaque génération est pondérée par le niveau de la population (mondiale) et par un facteur d'actualisation, avec une préférence pure pour le présent, η , valant 1 ou 3 %. an^{-1} .

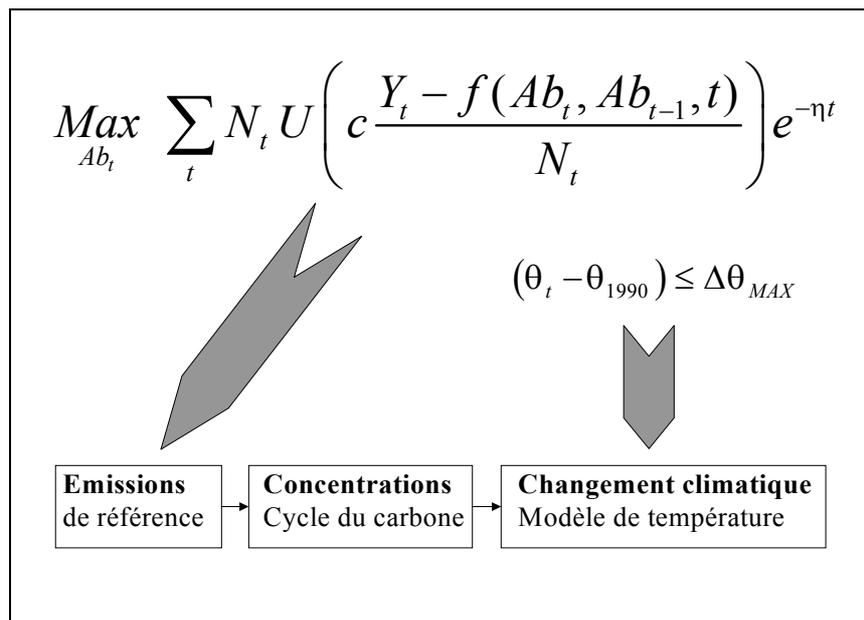


Figure V-1. Analyse coût-efficacité et politique climatique optimale.

Soit (a^*) la solution du programme précédent : dans un corridor d'émissions acceptable (défini par la contrainte environnementale), c'est la répartition des efforts la plus efficace étant donné les paramètres technico-économiques, environnementaux et sociaux.

Considérons maintenant le programme coût-bénéfice suivant, présenté Figure V-2, qui correspond à un programme de maximisation inter-temporelle de l'utilité de l'agent représentatif de chaque génération, dont le bien-être dépend d'une part de la consommation privée *per capita* (nette des coûts d'abattement) et d'autre part de la qualité du climat, mesurée selon l'augmentation de la température moyenne globale. Le planificateur détermine le niveau d'abattement optimal à partir d'un arbitrage (inter-temporel) entre utilité dérivée de la

consommation privée et utilité dérivée de l'environnement. Les mêmes hypothèses que précédemment, relatives au partage consommation/investissement, à la répartition des coûts d'abattement, à la pondération des générations successives dans la fonction objectif du planificateur, s'appliquent ici.

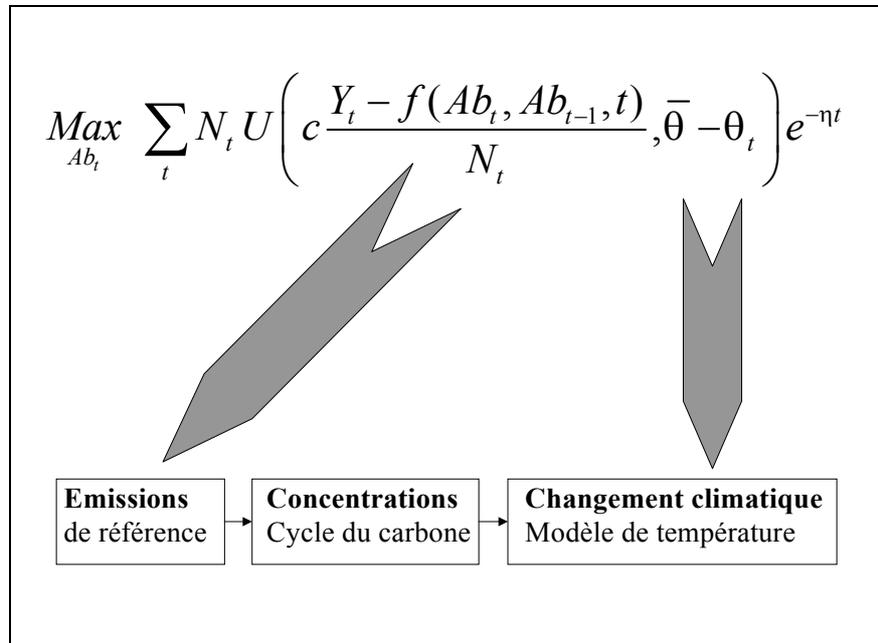


Figure V-2. Analyse coût-bénéfice et politique climatique optimale.

Existe-t-il des spécifications de la fonction d'utilité relatives à la 'Préférence pour la stabilité du climat' qui peuvent conduire le planificateur à choisir une trajectoire optimale d'émissions semblable à celle que l'on obtient dans un cadre coût-efficacité, c'est à dire qui peuvent le conduire à fixer le même seuil de réchauffement dangereux ? C'est ce que l'on va rechercher pour calibrer l'élasticité de notre fonction d'utilité vis à vis de la qualité du climat, en adoptant la démarche suivante.

Si la trajectoire (a.*) calculée précédemment en coût-efficacité est également solution du programme en coût-bénéfice, alors cette trajectoire maximise l'utilité intertemporelle. Dans ce cas, tout autre contrainte environnementale conduit à un niveau inférieur de l'objectif du planificateur. Par exemple, si la contrainte est plus lâche, on est conduit à entreprendre moins d'efforts ce qui se traduit par davantage de consommation privée (hausse relative de l'utilité du fait de ce flux de consommation plus important) mais en même temps par des températures plus élevées (baisse relative de l'utilité du fait d'une dégradation de l'environnement) ; et en référence à l'optimum, c'est ce second effet qui l'emporte et la résultante se traduit par une baisse de l'utilité inter-temporelle.

L'optimum se caractérise donc par une situation où l'accroissement de l'utilité du fait d'une amélioration de la qualité de l'environnement (c'est à dire plus d'efforts) est compensé par une diminution de l'utilité du fait d'une baisse de la consommation privée, et réciproquement. C'est ce principe que nous utilisons pour caractériser la fonction d'utilité à laquelle se référerait implicitement le planificateur bienveillant quand il formule des contraintes environnementales pour évaluer des politiques climatiques dans un cadre coût-efficacité. Plus précisément, quand on relâche ou quand on resserre le seuil de réchauffement jugé dangereux de manière

marginale, les variations de l'utilité inter-temporelle sont négatives car c'est un optimum social et sont égales car on assiste à la compensation des deux effets (en faisant l'hypothèse d'une symétrie de la valeur de l'utilité inter-temporelle autour de cet optimum).

Ainsi, pour déterminer quel paramétrage de la fonction d'utilité à deux biens conduit à recommander un seuil critique de réchauffement de +2°C, on va partir des trajectoires d'abattement et des profils de réchauffement qui leur sont associés obtenus en coût-efficacité pour les contraintes +1,9°C, +2,0°C et +2,1°C. Soient $(a_t^{1,9})$, $(a_t^{2,0})$, $(a_t^{2,1})$, $(\theta_t^{1,9})$, $(\theta_t^{2,0})$, $(\theta_t^{2,1})$ ces trajectoires (respectivement pour les niveaux d'abattement et les sentiers de réchauffement).

La variation de l'utilité inter-temporelle quand on resserre la contrainte de +2°C à +1,9°C, $\Delta U_{2,0 \rightarrow 1,9}$, s'écrit :

$$\begin{aligned} \Delta U_{2,0 \rightarrow 1,9} &= \sum_t N_t U \left(c \frac{(Y_t - f(a_t^{1,9}, a_{t-1}^{1,9}, t))}{N_t}, (\bar{\theta} - \theta_t^{1,9}) \right) e^{-\eta t} - \sum_t N_t U \left(c \frac{(Y_t - f(a_t^{2,0}, a_{t-1}^{2,0}, t))}{N_t}, (\bar{\theta} - \theta_t^{2,0}) \right) e^{-\eta t} \\ &= \sum_t N_t \left[U \left(c \frac{(Y_t - f(a_t^{1,9}, a_{t-1}^{1,9}, t))}{N_t}, (\bar{\theta} - \theta_t^{1,9}) \right) - U \left(c \frac{(Y_t - f(a_t^{2,0}, a_{t-1}^{2,0}, t))}{N_t}, (\bar{\theta} - \theta_t^{2,0}) \right) \right] e^{-\eta t} \\ &= \sum_t N_t \left[\frac{\partial U \left(c \frac{(Y_t - f(a_t^{2,0}, a_{t-1}^{2,0}, t))}{N_t}, (\bar{\theta} - \theta_t^{2,0}) \right)}{\partial \text{Consommation}} \cdot \Delta \text{Conso}_{2,0 \rightarrow 1,9} \dots \right. \\ &\quad \left. + \frac{\partial U \left(c \frac{(Y_t - f(a_t^{2,0}, a_{t-1}^{2,0}, t))}{N_t}, (\bar{\theta} - \theta_t^{2,0}) \right)}{\partial C \text{ lim at}} \cdot \Delta C \text{ lim at}_{2,0 \rightarrow 1,9} e^{-\eta t} \right] \\ &= \sum_t \left[\frac{(\bar{\theta} - \theta_t^{2,0})^\beta}{c \frac{(Y_t - f(a_t^{2,0}, a_{t-1}^{2,0}, t))}{N_t}} \left(c \frac{(f(a_t^{2,0}, a_{t-1}^{2,0}, t) - f(a_t^{1,9}, a_{t-1}^{1,9}, t))}{N_t} \right) \dots \right. \\ &\quad \left. - \beta \ln \left(c \frac{(Y_t - f(a_t^{2,0}, a_{t-1}^{2,0}, t))}{N_t} \right) (\bar{\theta} - \theta_t^{2,0})^{(\beta-1)} (\theta_t^{2,0} - \theta_t^{1,9}) \right] e^{-\eta t} \end{aligned}$$

On peut utiliser un développement de Taylor à l'ordre 1 pour évaluer cette expression car entre les trois contraintes, le niveau de consommation privée varie au maximum de 0,6% et les trajectoires de température - bien qu'elles n'atteignent pas le même niveau de stabilisation à long-terme - suivent des trajectoires assez comparables.

De même, $\Delta U_{2,0 \rightarrow 2,1}$, la variation de l'utilité inter-temporelle quand on relâche la contrainte de $+2^\circ\text{C}$ à $+2,1^\circ\text{C}$ s'écrit :

$$\Delta U_{2,0 \rightarrow 2,1} = \sum_t \left[\frac{(\bar{\theta} - \theta_t^{2,0})^\beta}{c \frac{(Y_t - f(a_t^{2,0}, a_{t-1}^{2,0}, t))}{N_t}} \left(c \frac{(f(a_t^{2,0}, a_{t-1}^{2,0}, t) - f(a_t^{2,1}, a_{t-1}^{2,1}, t))}{N_t} \right) \dots \right. \\ \left. - \beta \ln \left(c \frac{(Y_t - f(a_t^{2,0}, a_{t-1}^{2,0}, t))}{N_t} \right) (\bar{\theta} - \theta_t^{2,0})^{(\beta-1)} (\theta_t^{2,0} - \theta_t^{2,1}) \right] e^{-\eta t}$$

Comme le planificateur est sensé avoir choisi la contrainte d'une manière socialement satisfaisante, l'utilité inter-temporelle correspondant au programme ($a^{2,0}$) est maximale et tout autre séquence d'abattement conduira à une fonction objectif du planificateur de valeur inférieure. Ainsi, $\Delta U_{2,0 \rightarrow 1,9}$ et $\Delta U_{2,0 \rightarrow 2,1}$ sont négatives parce que dans le premier cas, le gain à la marge des satisfactions retirées d'un climat moins perturbé (le seuil de réchauffement passe de $+2,0^\circ\text{C}$ à $+1,9^\circ\text{C}$) est plus que compensé par les pertes de bien-être imputables à un sacrifice supplémentaire de consommation, et dans le second, pour la raison exactement symétrique. Si $+2,0^\circ\text{C}$ est la contrainte socialement optimale, les pertes et gains infinitésimaux de l'utilité inter-temporelle pour des variations relativement faibles de cette contrainte doivent se compenser (en faisant l'hypothèse d'une symétrie de la valeur de l'utilité inter-temporelle autour de cet optimum). La décroissance de l'utilité du fait du sacrifice de consommation quand on resserre la contrainte doit être égale à la décroissance de l'utilité du fait d'une dégradation de la qualité du climat quand on desserre la contrainte, c'est à dire :

$$\Delta U_{2,0 \rightarrow 1,9} - \Delta U_{2,0 \rightarrow 2,1} = 0$$

C'est sur cette relation que s'effectue le calibrage. Le paramètre $\bar{\theta}$ (le seuil absolu de réchauffement au delà duquel le changement climatique est perçu comme indubitablement *dangereux*) est fixé de manière exogène avec une valeur centrale de $+4^\circ\text{C}$ (et en explorant les valeurs de $+2,5^\circ\text{C}$ à $+6^\circ\text{C}$, par incrément de $0,5^\circ\text{C}$). Le paramètre β , l'élasticité de la fonction d'utilité vis à vis de la qualité du climat, est ensuite déterminé à l'aide de la relation précédente.

Sensibilité du climat	$+2,5^\circ\text{C}$	$+3,5^\circ\text{C}$	$+4,5^\circ\text{C}$
PPPt = 1%.an ⁻¹	$\beta = 1,62 \times 10^{-4}$	$\beta = 7,55 \times 10^{-4}$	$\beta = 12,80 \times 10^{-4}$
PPPt = 3%.an ⁻¹	$\beta = 3,06 \times 10^{-4}$	$\beta = 17,83 \times 10^{-4}$	$\beta = 35,45 \times 10^{-4}$

Tableau V-1. Valeurs de l'élasticité climat de la fonction d'utilité (β) selon la sensibilité du climat et la préférence pure pour le présent.

Dans de telles conditions, la valeur de β dépend d'un certain nombre d'hypothèses puisque ce paramètre est le reflet d'un bilan coût-bénéfice qui conduirait à accepter comme socialement optimal un seuil de réchauffement donné. Ces hypothèses et paramètres sont notamment la préférence pure pour le présent (2 valeurs examinées : 1 et 3%.an⁻¹), les données sociales, techniques et économiques (population, revenu, émissions et coûts d'abattement - qui restent sur toutes les simulations identiques) et la dynamique du climat (plus la sensibilité du climat est élevée, plus les coûts de respect d'une contrainte donnée sont importants donc plus le consentement à payer pour éviter le réchauffement croît). Au delà, bien sûr, il y a l'influence du

paramètre $\bar{\theta}$ et du seuil de réchauffement critique finalement retenu. Le Tableau V-1 présente les résultats du calibrage pour différentes valeurs de la sensibilité du climat et de la préférence pure pour le présent ; on a $\bar{\theta} = +4^{\circ}\text{C}$ et $\Delta\theta_{MAX} = +2^{\circ}\text{C}$.

Pour examiner les résultats du calibrage, on peut étudier comment varie le consentement à payer pour un réchauffement de $+2^{\circ}\text{C}$ en fonction de la sensibilité du climat, de la préférence pure pour le présent et du paramètre $\bar{\theta}$. Comme ce consentement n'est pas indépendant du niveau de revenu, on doit tenir compte dans les calculs du fait que le revenu de référence n'est pas le même selon les valeurs de la sensibilité du climat puisque la date à laquelle un réchauffement de $+2^{\circ}\text{C}$ est atteint est de plus en plus proche d'aujourd'hui quand la sensibilité du climat croît. A titre d'information, ce seuil est atteint en 2100 (resp. en 2050 et 2040) quand la sensibilité du climat vaut $+2,5^{\circ}\text{C}$ (resp. $+3,5^{\circ}\text{C}$ et $4,5^{\circ}\text{C}$) et à ces dates le revenu *per capita* vaut 74 900, 27 535 et 20830 *US90*\$. Les résultats sont présentés Figure V-3.

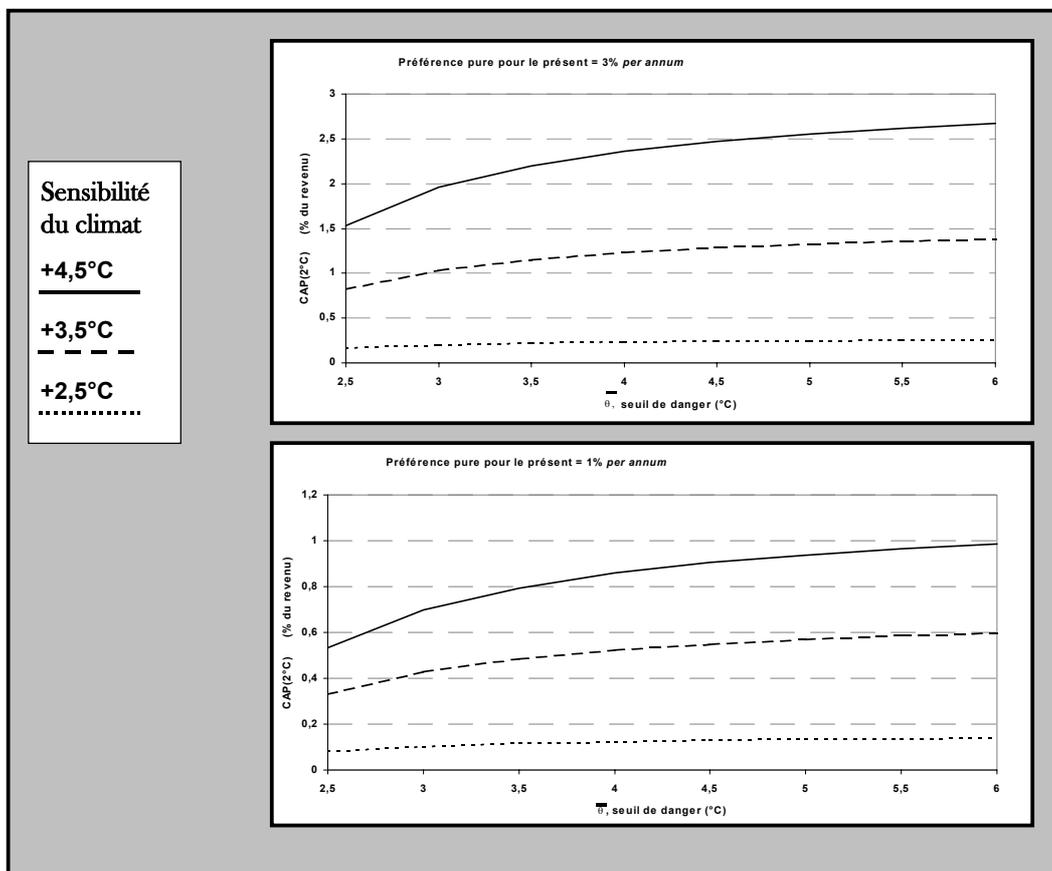


Figure V-3. Analyse de sensibilité du consentement à payer selon les résultats du calibrage.

Les consentements à payer (CAP) restent du même ordre de grandeur que les évaluations des dommages disponibles pour un réchauffement de l'ordre de $+2^{\circ}\text{C}$: au maximum 3% du revenu.

On peut d'abord constater que toutes choses égales par ailleurs, le CAP est croissant en fonction de la sensibilité du climat : par rapport à la valeur la plus basse de la sensibilité du climat ($+2,5^{\circ}\text{C}$), le CAP est en moyenne 4 fois supérieur quand la sensibilité du climat vaut $+3,5^{\circ}\text{C}$ et 7 fois quand elle vaut $+4,5^{\circ}\text{C}$ pour une valeur de 1 *%an*⁻¹ de la préférence pure pour

le présent ; ces ratios valent respectivement 5 et 10 quand la préférence pure pour le présent passe à 3 $\%.\text{an}^{-1}$. L'explication en est la suivante, en se rappelant que l'on a révélé les CAPs qui correspondent à un seuil de réchauffement donné : si on cherche à ne pas franchir un seuil de réchauffement dangereux, plus la sensibilité du climat est élevée, plus il faut fournir d'efforts ; plus donc le CAP est élevé pour justifier ce seuil qui demande des efforts croissants. A cet effet, s'ajoute un effet revenu : plus la sensibilité du climat est élevée, plus, on l'a vu, la date à laquelle un réchauffement de $+2^{\circ}\text{C}$ est atteint est précoce, le revenu est donc de plus en plus faible ; or une sensibilité du climat élevée demande des efforts plus importants, qui en part relative du revenu, semblent encore plus importants du fait que le revenu est plus faible.

De même, on peut constater que le CAP est croissant avec la préférence pure pour le présent : en moyenne, le ratio entre deux valeurs du CAP associées à une préférence pure pour le présent valant 3 $\%.\text{an}^{-1}$ et 1 $\%.\text{an}^{-1}$ vaut 1,85 (sensibilité du climat= $+2,5^{\circ}\text{C}$), 2,30 (sensibilité du climat = $+3,5^{\circ}\text{C}$) et 2,75 (sensibilité du climat= $+4,5^{\circ}\text{C}$). Quand la préférence pure pour le présent croît, les efforts dans un cadre coût-efficacité ont tendance à être repoussés vers le futur; plus il faut donc un CAP élevé, dans un cadre coût-bénéfice, pour justifier des efforts plus importants et plus tardifs quand la préférence pure pour le présent vaut 3 $\%.\text{an}^{-1}$.

Enfin, le CAP croît selon $\bar{\theta}$ (le seuil absolu de réchauffement au delà duquel le changement climatique est perçu comme indubitablement *dangereux*). L'influence de ce paramètre semble cependant moins importante que celle de la sensibilité du climat ou de la préférence pure pour le présent. Plus $\bar{\theta}$ croît, plus l'intervalle de réchauffement admissible s'agrandit, plus il faut donc un CAP important pour justifier une contrainte sur l'amplitude du réchauffement comme $+2^{\circ}\text{C}$.

II. RESPONSE_II: un modèle coût-bénéfice d'optimisation inter-temporelle des politiques climatiques, en présence d'une 'Préférence pour la stabilité du climat'

RESPONSE_II est un modèle intégré coût-bénéfice de recherche de politiques climatiques optimales, faisant appel à une 'Préférence pour la stabilité du climat' (voir Encadré V-1). L'objectif du planificateur central est de maximiser l'utilité inter-temporelle des générations successives, dont le bien-être dépend d'une part de la consommation privée *per capita* (nette des coûts d'abattement) et d'autre part de la qualité du climat, mesurée selon l'augmentation de la température moyenne globale de l'atmosphère. Le planificateur détermine le niveau d'abattement optimal à partir d'un arbitrage inter-temporel entre utilité dérivée de la consommation privée et utilité dérivée de l'environnement. On fait l'hypothèse que les coûts d'abattements, $f(.,.,.)$, sont soustraits à chaque période à la consommation et l'investissement⁴ dans une proportion identique à celle du scénario de référence (ici, propension à consommer, c , constante, égale à 0,8) et que le revenu, Y , est réparti uniformément au sein de la population (N) à chaque période. Dans l'objectif du planificateur, le bien-être de l'agent représentatif de chaque génération est pondérée par la taille de la population à cette génération et par un facteur d'actualisation (η , la préférence pure pour le présent, valant 1 ou 3 $\%.\text{an}^{-1}$). Toutes les autres

⁴ Ce qui en toute logique devrait conduire à une inflexion du scénario de croissance. On fait l'hypothèse que les coûts d'abattement étant faibles par rapport au revenu, cette rétroaction négative sur la croissance ne se manifeste pas.

spécifications de *RESPONSE*_{II} (scénario socio-économique de référence, formes des coûts d'abatement, modélisation de la chaîne causale qui va des émissions de GES au changement climatique (cycle du carbone et module d'évolution de la température), conditions initiales, horizon du modèle, pas de temps, langage de programmation) sont communes à la famille *RESPONSE* et ont déjà été présentées au chapitre précédent

Encadré V-1. *RESPONSE*_{II} : un modèle coût-bénéfice de recherche de politique climatique optimale en présence d'une 'Préférence pour la stabilité du climat'.

Le code du modèle est disponible en annexe.

Fonction objectif : maximisation de l'utilité inter-temporelle des générations successives

$$\text{Max}_{A_t} \sum_{t=1990}^{2300} N_t \left\{ \ln \left(c \frac{Y_t - f(A_t, A_{t-1}, t)}{N_t} \right) \left(\bar{\theta} - (\theta_{At}(t) - \theta_{At}(1990)) \right)^\beta \right\} e^{-\eta(t-1990)}$$

Emissions de référence de CO₂ (em_t)

données exogènes, tirées du scénario de référence (A1-m).

Cycle du carbone

$$\begin{pmatrix} A_{t+1} \\ B_{t+1} \\ O_{t+1} \end{pmatrix} = C_{trans} \cdot \begin{pmatrix} A_t \\ B_t \\ O_t \end{pmatrix} + \delta \cdot (1 - A_t) em_t \cdot \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}$$

Evolution de la température moyenne globale

$$\begin{bmatrix} \theta_{At}(t+1) \\ \theta_{Oc}(t+1) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 - \sigma_1(\lambda + \sigma_2) & \sigma_1\sigma_2 \\ \sigma_3 & 1 - \sigma_3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \theta_{At}(t) \\ \theta_{Oc}(t) \end{bmatrix} + \sigma_1 \begin{bmatrix} F_{2X} \log(A_t / A_{PI}) / \log 2 \\ 0 \end{bmatrix}$$

II.1. Trajectoires d'émissions en mode coût-efficacité et coût-bénéfice : résultats des modèles *RESPONSE*

Une des motivations de passer d'un cadre coût-efficacité à un cadre coût-bénéfice est de dépasser une des limites des analyses coût-efficacité, sur laquelle nous avons conclu le chapitre précédent. Dans des configurations particulièrement défavorables (seuil critique de réchauffement très bas, sensibilité du climat élevée), les recommandations du modèle impliquent souvent d'entreprendre des efforts de réduction des émissions importants (et ce, dès le court-terme) de manière à satisfaire les contraintes environnementales. Un relâchement temporaire de ces contraintes pourrait autoriser à entreprendre moins d'efforts ou à les repousser quelque peu mais ce type d'arbitrage ne peut par nature exister au sein d'une analyse coût-efficacité. Il est en revanche envisageable dans une analyse coût-bénéfice où peuvent être mis en balance les coûts des politiques climatiques et leurs bénéfices (ici, en termes de gains en bien-être liés à une amélioration de la qualité du climat), ce qui permet d'étudier l'ajustement à la marge des contraintes environnementales.

C'est ce que nous nous proposons d'examiner dans cette section en comparant les résultats des modèles *RESPONSE* en coût-efficacité (*RESPONSE_Θ*), pour un seuil critique de réchauffement donné - autrement dit un objectif jugé socialement désirable, et en coût-bénéfice (*RESPONSE_Π*), pour des préférences vis à vis du climat correspondant à ce même objectif (cf. procédure de calibrage *supra*). Plus précisément, nous allons comparer les deux approches en cas certain pour les situations suivantes : niveau critique de réchauffement +2°C/ préférences vis à vis du climat ($\bar{\theta}$, β) calibrées en conséquence, préférence pure pour le présent 1 ou 3 $\% \cdot an^{-1}$, trois valeurs pour la sensibilité du climat {2,5°C ; +3,5°C ; +4,5°C}.

On peut constater Figure V-4 que dans l'ensemble, les trajectoires de réchauffement suivent des sentiers relativement similaires entre cadre coût-bénéfice et cadre coût-efficacité. En particulier, on n'observe quasiment pas de dépassement du seuil jugé désirable (i. e., +2°C) pour les analyses coût-bénéfice : pour une préférence pure pour le présent valant 1 $\% \cdot an^{-1}$, ce dépassement est au maximum de 0,05°C et dure une trentaine d'années (et on l'observe pour une valeur élevée de la sensibilité du climat) ; quand la préférence pure pour le présent vaut 3 $\% \cdot an^{-1}$, ce dépassement s'observe pour les deux valeurs les plus élevées de la sensibilité du climat et dans les deux cas, atteint au maximum une amplitude de 0,1°C et s'étend sur 50 à 60 ans. Ainsi, dans une approche coût-bénéfice, on observe bien un relâchement temporaire et modéré de l'objectif jugé socialement désirable. Cependant cela ne signifie pas que les efforts d'abattement ont été moins importants ou retardés au début du XXI^{ème} siècle. Bien au contraire, on peut constater que pendant leur phase ascendante jusqu'à +2°C, les trajectoires de réchauffement en mode coût-bénéfice sont systématiquement inférieures (jusqu'à près de 0,1°C vers 2070) aux trajectoires correspondantes en mode coût-efficacité : autrement dit les efforts d'abattement n'ont pas été inférieurs (au moins pendant les premières décennies).

Pour s'en convaincre, examinons maintenant les coûts associés (en % du PIB) à ces trajectoires de réchauffement (voir Figure V-5). On constate en effet que pour les premières décennies, les coûts d'abattement sont systématiquement supérieurs en mode coût-bénéfice aux coûts d'abattement en mode coût-efficacité ; les efforts sont donc plus importants dans le premier cas (éventuellement, jusqu'au double).

On peut surtout remarquer que la différence entre coût-efficacité et coût-bénéfice se traduit ici par une différence dans la répartition des efforts entre générations : dans tous les cas, on observe un pic d'efforts mais il est toujours plus précoce (d'au moins 30 ans) pour une analyse coût-efficacité que pour une analyse coût-bénéfice et la phase d'ascension vers ce pic y est également toujours plus creusée. Autrement dit, la distribution des efforts entre générations se traduit par des sacrifices très différenciés en mode coût-efficacité (car on y repousse le plus possible les efforts, sous l'effet conjugué de l'actualisation, de l'inertie socio-économique et du progrès technique autonome - voir *infra*, Chapitre II, § III -, ce qui implique en contrepartie qu'ils devront être d'autant plus intenses ultérieurement) et beaucoup moins en mode coût-bénéfice où la répartition est davantage égalitaire.

Pour une analyse coût-efficacité, on peut constater d'ailleurs que si la préférence pure pour le présent n'affecte pas le volume global d'effort (l'aire sous la courbe), elle en modifie la chronique: pour une valeur faible (1 $\% \cdot an^{-1}$), les efforts sont entrepris plus tôt, le pic recule d'une dizaine d'années et son amplitude est moindre. Pour une analyse coût-bénéfice en revanche, la chronique des efforts n'est pas sensible à la valeur de la préférence pure pour le présent à la différence du niveau global d'efforts : pour une valeur faible (1 $\% \cdot an^{-1}$), les efforts sont systématiquement plus importants (en moyenne d'un facteur 1,8 -sensibilité du climat = 2,5°C- à 1,2 -sensibilité du climat = 4,5°C-) que pour une valeur élevée (3 $\% \cdot an^{-1}$).

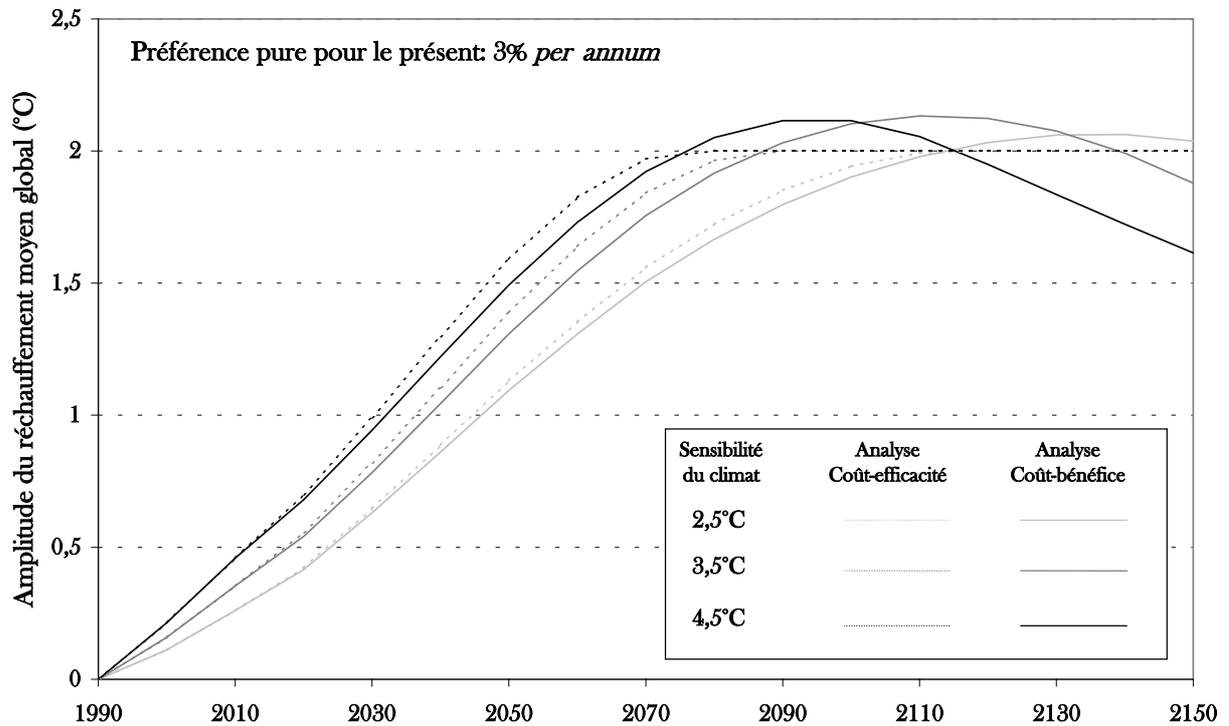
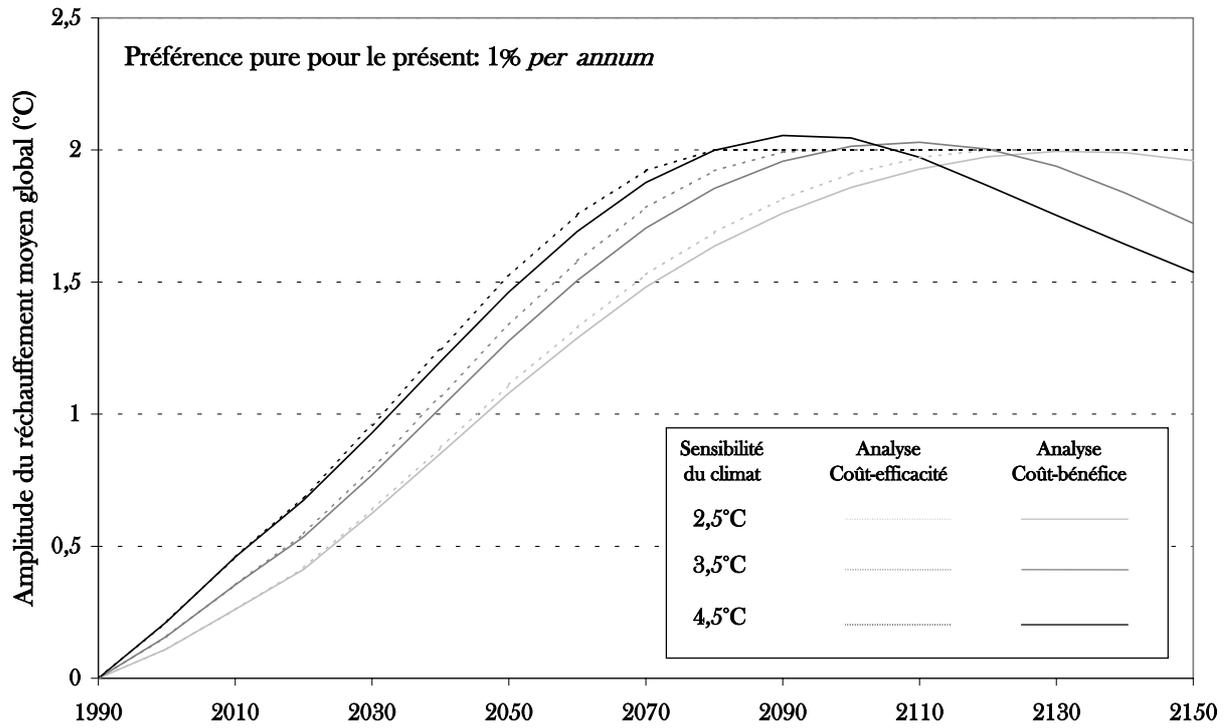


Figure V-4. Amplitude du réchauffement moyen global pour 3 valeurs de la sensibilité du climat.

Dans un cadre coût-bénéfice (trait plein) pour des préférences vis à vis du climat correspondant à un objectif socialement désirable de +2°C et dans un cadre coût-efficacité (pointillé) avec un seuil critique de réchauffement de +2°C. En haut : préférence pure pour le présent = 1%.an⁻¹ ; en bas : préférence pure pour le présent = 3%.an⁻¹.

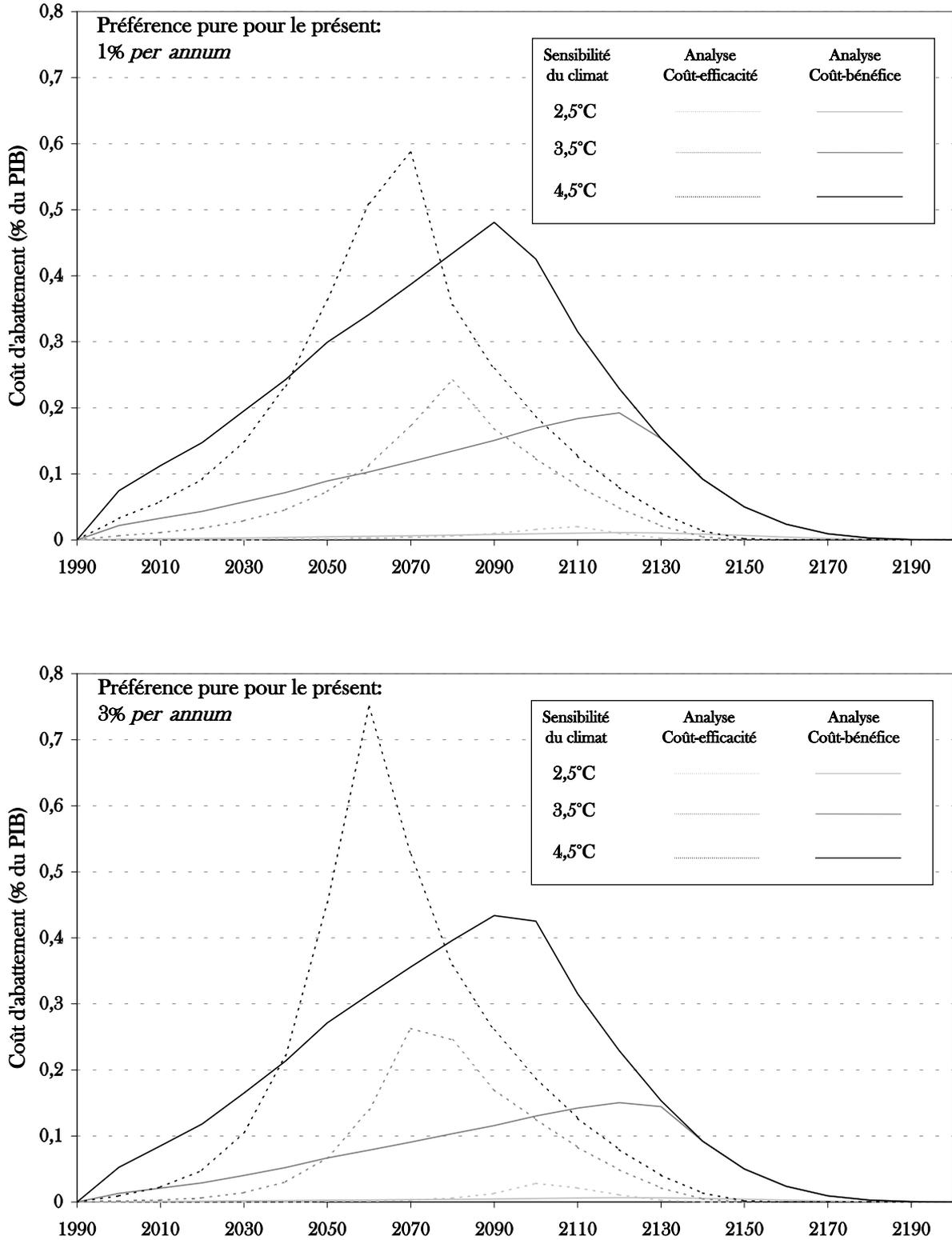


Figure V-5. Coûts d'abattement pour 3 valeurs de la sensibilité du climat.

Dans un cadre coût-bénéfice (trait plein) pour des préférences vis à vis du climat correspondant à un objectif socialement désirable de +2°C et dans un cadre coût-efficacité (pointillé) avec un seuil critique de réchauffement de +2°C. En haut : préférence pure pour le présent = 1 %.ai⁻¹ ; en bas : préférence pure pour le présent = 3 %.ai⁻¹.

Enfin, plus la sensibilité du climat prend une valeur basse, plus le pic d'efforts est repoussé dans le temps et plus l'amplitude générale des efforts est faible. Ce dernier point n'est pas une surprise : en effet, plus la sensibilité du climat est faible, moins il est nécessaire d'entreprendre d'efforts et plus il est possible de les reculer sans trop peser sur l'équité intergénérationnelle.

Dans cette analyse, le point important est qu'en mode coût-bénéfice, même si on peut s'autoriser un dépassement temporaire de l'objectif socialement désirable, les efforts à court-terme n'en sont pas moins importants qu'en mode coût-efficacité pour un seuil critique de réchauffement fixé au niveau de l'objectif socialement désirable. Examinons le modèle suivant, très simplifié, pour en comprendre les mécanismes.

II.2. Trajectoires d'émissions en mode coût-efficacité et coût-bénéfice : un modèle analytique

On considère deux périodes, indicées 1 et 2. Les émissions de références y sont E_1^{ref} et E_2^{ref} . Soient a_1 et a_2 les efforts d'abattement à chacune de ces périodes ; on a $0 \leq a_1 \leq E_1^{ref}$ et $0 \leq a_2 \leq E_2^{ref}$. Soient $C(.)$, la fonction de coût d'abattement, et Y_1 et Y_2 , le niveau du revenu à chaque période, avec $Y_1 < Y_2$ (croissance globale de l'économie dans le scénario de référence). On fait l'hypothèse que les coûts d'abattement sont positifs (pas de potentiels sans regrets) et qu'ils sont strictement convexes de même que le coût marginal d'abattement ($C, C', C'', C''' > 0$; ces quatre fonctions ne s'annulent éventuellement qu'en 0). Soient M_1 et M_2 les concentrations atmosphériques de CO₂ à chacune des deux périodes ; on a $M_1 = M_1^{ref} - a_1$ et $M_2 = M_2^{ref} - a_2 - \delta a_1$, où M_1^{ref} et M_2^{ref} désignent les concentrations de référence. δ , $0 < \delta < 1$, représente un facteur de *dépréciation* du stock de CO₂ atmosphérique du fait de l'activité des puits biosphérique et océanique : c'est la fraction du stock de carbone atmosphérique de la première période qui subsiste dans l'atmosphère à la seconde. Quand il tend vers 0, les inerties naturelles sont nulles et les émissions de GES sont une externalité de flux ; à l'inverse, quand il tend vers 1, l'externalité de stock est à son maximum. On peut remarquer que l'on néglige le délai entre l'émission d'une certaine quantité de GES et son accumulation dans l'atmosphère ; c'est à dire que les périodes sont suffisamment longues.

Dans ce contexte, on va maintenant considérer deux cadres d'analyse des politiques climatiques : une approche coût-efficacité et une approche coût-bénéfice.

II.2.1 Approche coût-efficacité

On cherche à résoudre le programme suivant :

$$\begin{aligned} & \underset{a_1, a_2}{\text{Max}} \quad U(Y_1 - C(a_1)) + \eta U(Y_2 - C(a_2)) \\ & \text{w.r.t.} \quad M_1, M_2 < \bar{M} \end{aligned}$$

où $U(.)$: fonction d'utilité, le bien-être ne dépendant que du niveau de revenu. $U^y(.) > 0$ et $U^{yy}(. < 0$ (où $U^y(.)$ (resp. $U^{yy}(.)$) désigne la dérivée première (resp. seconde) de la fonction d'utilité),

η : facteur d'actualisation, $0 < \eta < 1$.

La contrainte est fixée de telle sorte qu'elle ne morde qu'en seconde période dans le scénario de référence : $M_1^{ref} < \bar{M} < M_2^{ref}$. C'est à dire que l'on cherche à répartir un budget carbone entre les deux périodes. Plus précisément en seconde période, on a :

$$M_2^{ref} - a_2 - \delta a_1 \leq \bar{M}.$$

Si cette contrainte est saturée, on a alors :

$$a_2 = M_2^{ref} - \bar{M} - \delta a_1.$$

Autrement dit, les efforts d'abattement sont antagonistes $\left(\frac{\partial a_2(a_1)}{\partial a_1} = -\delta \right)$: plus on entreprend d'efforts en première période, moins il faut en entreprendre à la seconde.

Soit (a_1^*, a_2^*) la solution du programme ; elle vérifie :

$$\begin{cases} -C'(a_1^*)U_1^Y + \eta\delta C'(M_2^{ref} - \bar{M} - \delta a_1^*)U_2^Y & = & 0 & (CPO) \\ -C''(a_1^*)U_1^Y + (C'(a_1^*))^2 U_1^{YY} \dots & & & \\ -\eta\delta^2 C''(M_2^{ref} - \bar{M} - \delta a_1^*)U_2^Y + \eta\delta^2 (C'(M_2^{ref} - \bar{M} - \delta a_1^*))^2 U_2^{YY} & < & 0 & (CSO) \\ a_2^* & = & M_2^{ref} - \bar{M} - \delta a_1^* & \end{cases}$$

Compte tenu des propriétés de convexité de $U(.)$ et de $C(.)$, la condition du second ordre (CSO) est toujours vérifiée. De la condition du premier ordre (CPO), il vient en particulier :

$$\frac{C'(a_1^*)}{C'(M_2^{ref} - \bar{M} - \delta a_1^*)} = \frac{C'(a_1^*)}{C'(a_2^*)} = \eta\delta \frac{U_2^Y}{U_1^Y}.$$

Le membre de droite, $\eta\delta U_2^Y/U_1^Y$, est strictement positif et strictement inférieur à 1 car $0 < \eta, \delta < 1, U^Y > 0$ et $U^{YY} < 0$ et $Y_2 - C(a_2^*) \approx Y_2 > Y_1 \approx Y_1 - C(a_1^*)$ ⁵. C'est à dire qu'à scénario de croissance déterminé, le ratio $\eta\delta U_2^Y/U_1^Y$ est constant, strictement positif et strictement inférieur à 1. Dès lors, sachant que la fonction de coût marginal d'abattement est strictement croissante, comme le ratio des coûts marginaux entre la première et la seconde période est strictement inférieur à 1, on a $a_1^* < a_2^*$; c'est à dire que les efforts d'abattement sont strictement croissants.

Représentons graphiquement cette solution dans le plan $(C'(a_2), C'(a_1))$ (voir Figure V-6). Avant tout, il nous faut déterminer le lieu des points $(C'(a_2), C'(a_1))$, soit (\mathcal{C}) cette courbe, pour tous les points (a_1, a_2) du segment $[A_1; A_2]$ porté par la droite (\mathcal{D}) d'équation $a_2 + \delta a_1 - (M_2^{ref} - \bar{M}) = 0$, avec $A_1 \left[(M_2^{ref} - \bar{M})/\delta ; 0 \right]$ et $A_2 \left[0 ; (M_2^{ref} - \bar{M}) \right]$. (\mathcal{D}) représente la relation entre le niveau d'abattement en première et en seconde période quand la contrainte en concentration est saturée en seconde période. On a vu que sa pente était négative et supérieure à -1 : $\partial a_2(a_1)/\partial a_1 = -\delta$; elle est donc moins inclinée que la seconde bissectrice du repère. Le segment $[A_1; A_2]$ est représenté dans le plan (a_1, a_2) dans le quadrant Nord-est de la Figure V-6. Dans le quadrant Sud-est, on représente la courbe $C'(a_1)$ quand a_1 décrit l'intervalle

⁵ Pour ce dernier point, on fait l'approximation que les coûts d'abattement ne représentant qu'une fraction très faible du revenu à chaque période (et on a pu le vérifier à la Figure V-5, où ils comptent pour moins de 1% du Pib à chaque date), le revenu net à chaque période n'est pas sensiblement différent du revenu de référence.

Comment évolue α quand $C'(a_2)$ décrit l'intervalle $\left[0; C'(M_2^{ref} - \bar{M})\right]$ (et que (a_1, a_2) parcourent le segment $[A_1; A_2]$) ? On trouve :

$$d\alpha = d\left(-\frac{C''(a_1)}{\delta C''(a_2)}\right) = -(\alpha da_2) \left(\frac{\delta C'''(a_1)}{C''(a_1)} + \frac{C'''(a_2)}{C''(a_2)}\right) = -\alpha \underbrace{\frac{dC'(a_2)}{C''(a_2)}}_{>0} \underbrace{\left(\frac{\delta C'''(a_1)}{C''(a_1)} + \frac{C'''(a_2)}{C''(a_2)}\right)}_{>0}.$$

Autrement dit, la pente de la tangente à (\mathcal{E}) est de moins en moins négative (la tangente s'incline de plus en plus sur l'horizontale) or c'est la valeur de la dérivée seconde de F donc la fonction F est strictement convexe.

Cherchons maintenant à placer la solution optimale du programme coût-efficacité sur la courbe (\mathcal{E}) (voir l'encart dans le quadrant Sud-ouest de la Figure V-6). Dans cet encart, on reconnaît la courbe (\mathcal{E}) et on a représenté la demi-droite $[Oz]$, telle que sa pente vaut $\eta\delta U_2^Y/U_1^Y$, strictement positif et strictement inférieur à 1 (voir *supra*). La solution optimale, (a^*_1, a^*_2) , se situe à l'intersection de (\mathcal{E}) et de la demi-droite $[Oz]$. On retrouve bien $a^*_1 < a^*_2$.

Examinons maintenant comment se déplace la solution optimale (a^*_1, a^*_2) pour des valeurs différentes du facteur d'actualisation, η , et de la constante caractéristique du cycle du carbone, δ .

Le facteur d'actualisation tout d'abord. On doit noter qu'en toute rigueur, dans le cadre d'un modèle de croissance optimale, toute modification de la préférence pure pour le présent (qui se répercute sur le facteur d'actualisation dans un sens inverse) modifie la trajectoire de croissance optimale du revenu et du stock de capital, dans le sens d'une croissance de plus en plus intensive en capital pendant les premières générations (le sacrifice de consommation au profit de l'épargne y est de plus en plus important) plus la préférence pure pour le présent décroît (plus le facteur d'actualisation croît). Ici, on fera pourtant l'hypothèse que le sentier de croissance n'est pas perturbé par des variations du facteur d'actualisation : le ratio U_2^Y/U_1^Y reste donc constant (strictement positif et strictement inférieur à 1 en faisant les mêmes hypothèses que précédemment). En première lecture, cela reste acceptable en considérant que le planificateur central cherche la distribution des efforts d'abattement entre générations successives à la marge du scénario de croissance avec des considérations d'équité intergénérationnelle qui ne sont pas systématiquement celles d'un scénario de croissance de référence sans changement climatique et sans politiques climatiques.

Explorons graphiquement (voir Figure V-7) comment se déplace la solution optimale (a^*_1, a^*_2) pour une valeur plus faible du facteur d'actualisation (c'est à dire moins on accorde de poids au bien-être des générations futures dans la fonction objectif - la préférence pour le présent a donc une valeur plus élevée). Soit η' cette valeur. C'est le seul paramètre du modèle qui soit modifié par rapport à la situation précédente. La courbe (\mathcal{E}) reste donc inchangée, seule la demi-droite $[Oz]$ est modifiée : elle devient la demi-droite $[Oz']$ et est plus inclinée sur l'horizontale que précédemment puisque $\eta' < \eta$. Cette rotation de $[Oz']$ implique que la solution optimale se déplace le long de (\mathcal{E}) dans le sens d'une diminution des efforts de court-terme et d'une augmentation correspondante des efforts de long-terme. A l'inverse, pour une valeur plus élevée du facteur d'actualisation (la préférence pure pour le présent est plus faible), on assiste à une augmentation des efforts de court-terme et une diminution des efforts de long-terme mais on aura toujours $a^*_1 < a^*_2$ (car la pente de la demi-droite $[Oz']$ est toujours strictement inférieure à 1). Autrement dit, plus la préférence pure pour le présent est élevée, plus la

répartition des efforts dans le temps devient inégalitaire, imposant un fardeau de plus en plus lourd aux générations futures. C'est ce que l'on avait observé Figure V-5.

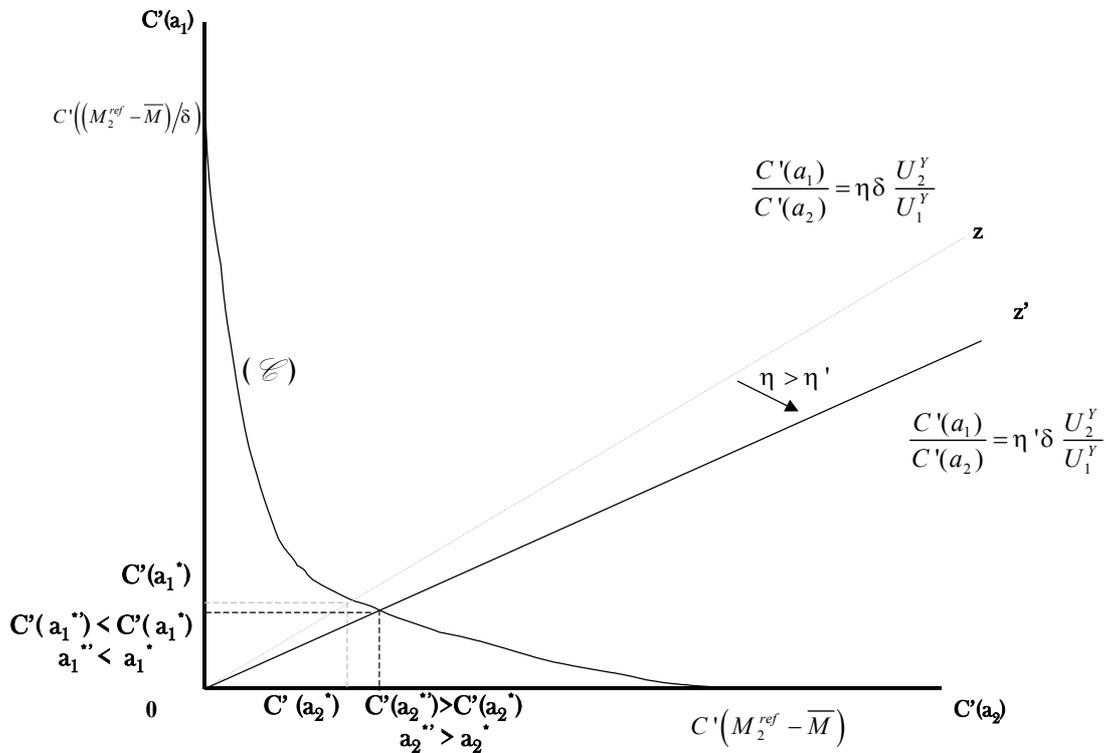


Figure V-7. Déplacement de la solution optimale du programme coût-efficacité pour une valeur plus faible du facteur d'actualisation.

Que se passe-t-il maintenant si *ceteris paribus*, on modifie la valeur du plafond de concentration, dans le sens d'un objectif plus strict, de \bar{M} à \bar{M}' avec $\bar{M}' < \bar{M}$; ce qui permet d'établir un parallèle avec un objectif formulé en seuil de réchauffement pour une valeur élevée de la sensibilité du climat.

La droite (\mathcal{S}) devient la droite (\mathcal{S}') d'équation $a_2 + \delta a_1 - (M_2^{ref} - \bar{M}') = 0$; dans le plan (a_1, a_2) elle se situe donc au-dessus de (\mathcal{S}) mais elle a la même pente. Autrement dit, le budget carbone est maintenant plus faible mais la substitution entre les efforts à chaque période s'opère au même taux. Cette modification se répercute sur la courbe (\mathcal{E}) qui devient la courbe (\mathcal{E}') ; (\mathcal{E}') est à nouveau une courbe convexe et elle se situe au-dessus de (\mathcal{E}) dans le plan $(C'(a_2), C'(a_1))$.

Retrouvons-le par le calcul. Les propriétés de convexité de (\mathcal{E}') se caractérisent de la même manière que pour (\mathcal{E}) et on constate qu'elles sont conservées. Pour la position des deux courbes, considérons C un point de (\mathcal{E}) de coordonnées $(C'(a_2), C'(a_1))$, et C' un point de (\mathcal{E}') de coordonnées $(C'(a_2'), C'(a_1'))$. Comparons $C'(a_1)$ et $C'(a_1')$. On a :

$$a'_1 = \frac{(M_2^{ref} - \bar{M}') - a_2}{\delta} > \frac{(M_2^{ref} - \bar{M}) - a_2}{\delta} = a_1$$

$$\Leftrightarrow C'(a'_1) > C'(a_1)$$

Donc (\mathcal{E}') se situe au-dessus de (\mathcal{E}) dans la plan $(C'(a_2), C'(a_1))$.

La condition du premier ordre, qui devient $\frac{C'(a_1^*)}{C'(a_2^*)} = \eta \delta \frac{U_2^Y}{U_1^Y}$, nous apprend que la solution optimale se place dans le même rapport de coût marginaux d'abattement que précédemment mais la position relative des courbes (\mathcal{E}) et (\mathcal{E}') implique que les efforts sont maintenant plus importants à chaque période (voir Figure V-8).

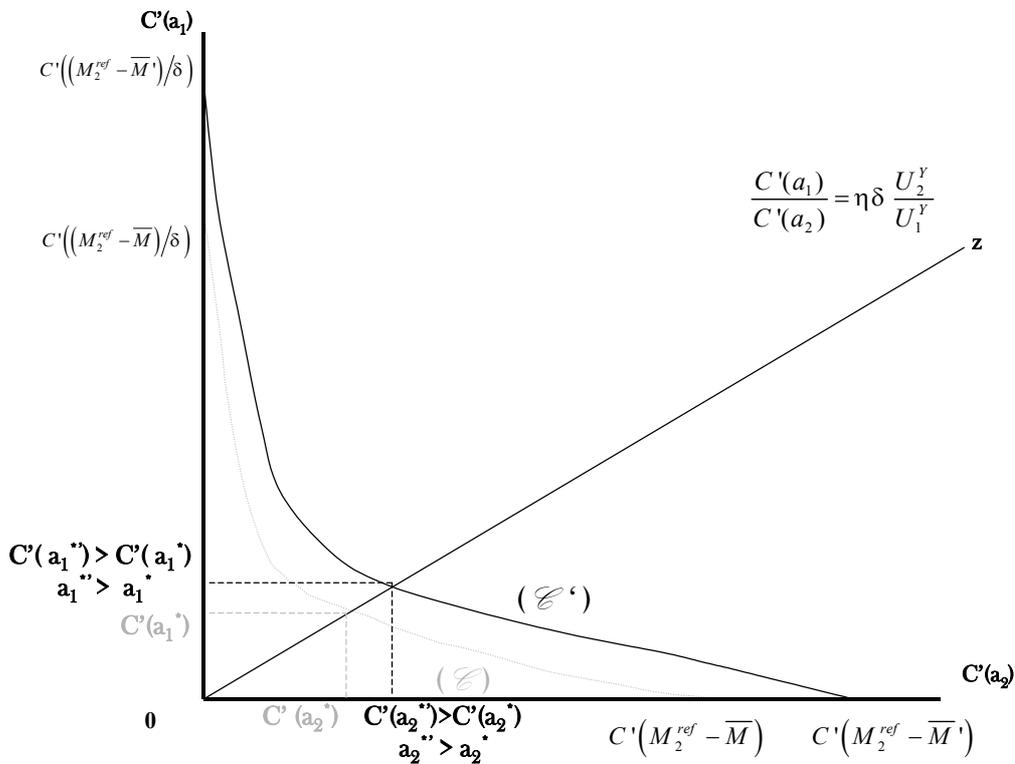


Figure V-8. Déplacement de la solution optimale du programme coût-efficacité pour une valeur plus contraignante (plus faible) du plafond de concentration.

Confirmons cette intuition par le calcul. Soit (a_1^*, a_2^*) la solution optimale du programme quand le plafond de concentration vaut \bar{M} ; elle vérifie entre autres d'après la CPO:

$$\frac{C'(a_1^*)}{C'(a_2^*)} = \eta \delta \frac{U_2^Y}{U_1^Y} = k \quad (0 < k < 1).$$

Examinons comment se comporte le niveau d'abatement optimal en première période, a_1^* , pour une perturbation infinitésimale du plafond de concentration, en se rappelant que (a_1^*, a_2^*) et \bar{M} sont liés par la relation $a_2 + \delta a_1 - (M_2^{ref} - \bar{M}) = 0$. On a donc :

$$\begin{cases} C'(a_1^*) = kC'(M_2^{ref} - \bar{M} - \delta a_1^*) & (k < 1) \\ kC'(a_2^*) = C'(M_2^{ref} - \bar{M} - a_2^*) & (k < 1) \end{cases}$$

Il vient :

$$\begin{cases} da_1 \underbrace{(C''(a_1^*) + \delta kC''(a_2^*))}_{>0} = -d\bar{M} \underbrace{kC''(a_2^*)}_{>0} \\ da_2 \underbrace{(C''(a_1^*) + \delta kC''(a_2^*))}_{>0} = -d\bar{M} \underbrace{C''(a_1^*)}_{>0} \end{cases}$$

Autrement dit, quand on resserre la contrainte ($d\bar{M} < 0$), le niveau d'effort en première et en seconde période s'accroît ($da_1, da_2 > 0$) et réciproquement quand on relâche la contrainte, les niveaux d'effort décroissent.

En conclusion, les analyses que nous avons entreprises nous permettent de retrouver les résultats mis en évidence à partir des simulations effectuées précédemment dans un cadre coût-efficacité et d'en expliquer les mécanismes. On peut ainsi caractériser l'influence sur l'amplitude et la distribution entre générations des efforts de réduction des émissions de l'actualisation et de la sensibilité du climat (pour un seuil de réchauffement donné ou, de manière équivalente, du plafond de concentration retenu) : plus la préférence pure pour le présent est élevée, plus la différenciation des efforts entre le court-terme et le long-terme s'accroît, dans le sens d'un report des efforts à plus long-terme ; plus le plafond de concentration retenu est finalement contraignant (ou plus la sensibilité du climat est élevée pour un seuil de réchauffement donné), plus le volume global des efforts doit être important.

II.2.2 Approche coût-bénéfice

Intéressons-nous maintenant à la trajectoire optimale d'efforts d'abatement obtenue dans un cadre coût-bénéfice, en comparant nos résultats précédents, pour un plafond de concentration \bar{M} , et les résultats suivants, où cette valeur correspond maintenant à un objectif désirable - compte tenu des préférences pour le climat et des profils des coûts. On cherche à résoudre le programme suivant :

$$\text{Max}_{a_1, a_2} U(Y_1 - C(a_1), M_1^{ref} - a_1) + \eta U(Y_2 - C(a_2), M_2^{ref} - a_2 - \delta a_1)$$

où $U(.)$: fonction d'utilité à deux variables, dont le premier argument est la consommation nette d'un bien composite agrégé (et l'écriture de la consommation comme le revenu moins les coûts d'abatement rend compte de l'arbitrage dans la répartition du revenu entre achat d'unité du bien composite et achat d'unités de protection de l'atmosphère) et dont le second argument désigne la qualité du climat (ici, mesurée simplement selon la concentration atmosphérique de CO_2). On a $U^Y(.) > 0$ et $U^{YY}(.) < 0$ (où $U^Y(.)$ (resp. $U^{YY}(.)$) désigne la dérivée première (resp. seconde) de la fonction d'utilité), $U^E(.) < 0$ et $U^{EE}(.) < 0$ et $U^{YE}(.) < 0$.

Soit (a'_1, a'_2) , la solution optimale du programme précédent. Elle vérifie au premier ordre :

$$\begin{cases} -C'(a'_1)U_1^Y - U_1^E - \delta\eta U_2^E = 0 \\ \eta[-C'(a'_2)U_2^Y - U_2^E] = 0 \end{cases} .$$

Autrement dit, à chaque période le coût marginal de l'effort est comparé aux gains en bien-être à la marge qu'il apporte du fait d'une protection accrue de l'atmosphère.

Pour rendre comparable analyse coût- efficacité et analyse coût-bénéfice, entre objectif absolu et objectif désirable, on fait l'hypothèse que le coût marginal de l'effort en seconde période est identique dans les deux cadres d'analyse, autrement dit :

$$C'(a'_2) = -\frac{U_2^E}{U_2^Y} = C'(a_2^*) .$$

Comparons maintenant le niveau d'effort à court-terme entre les deux cadres d'analyse. On a :

$$\begin{cases} C'(a'_1) = -\frac{U_1^E + \delta\eta U_2^E}{U_1^Y} = -\frac{U_1^E + \delta\eta C'(a_2^*)U_2^Y}{U_1^Y} \\ C'(a_1^*) = -\frac{\delta\eta C'(a_2^*)U_2^Y}{U_1^Y} \end{cases} .$$

Il vient :

$$\begin{aligned} C'(a'_1) - C'(a_1^*) &= -\frac{U_1^E}{U_1^Y} > 0 \quad (U_1^E < 0, U_1^Y > 0) \\ \Rightarrow \quad a'_1 &> a_1^* \end{aligned}$$

Ainsi donc, le formalisme coût-bénéfice implique finalement plus d'efforts à court-terme que le formalisme correspondant coût-efficacité car le coût marginal de l'effort initial est dans ce cas opposé à la séquence temporelle des dommages évités à la marge, ce qui ne se produit bien sûr pas dans un cadre coût-efficacité où le coût marginal de l'effort croît au rythme de l'actualisation pondéré de la constante caractéristique du cycle du carbone.

En conclusion, en passant d'une approche coût-efficacité à une approche coût-bénéfice, d'un seuil de réchauffement absolu à un objectif en amplitude du réchauffement désirable, on peut observer que même si dans le second cas on autorise un dépassement temporaire de ce niveau pour écreter le pic d'efforts supporté par les générations de la seconde moitié du siècle, le niveau d'effort à court-terme y est systématiquement plus important.

Ces résultats ont été obtenus en univers certain. Etudions maintenant ce qui se passe en présence d'incertitude où l'arbitrage entre intensification des efforts d'abattement et relâchement transitoire des objectifs climatiques prend tout son sens dans l'éventualité de configurations particulièrement défavorables et de surprises concernant le climat ou les impacts du changement climatique. Si on suit une approche séquentielle à la décision, comment joue un tel arbitrage dans un cadre coût-bénéfice? Comment se traduit-il sur le niveau d'effort avant l'arrivée d'information? Quel est l'impact de l'apprentissage sur la politique optimale de précaution? Ce sont ces questions que nous allons étudier maintenant.

III. Incertitudes sur la dynamique du climat, croyances sur les risques climatiques et analyse coût-bénéfice des politiques climatiques

On a vu aux chapitres III et IV combien, dans des formalismes coût-efficacité avec des plafonds de concentration ou des seuils sur l'amplitude du réchauffement et son rythme, l'éventualité de situations défavorables (sensibilité du climat élevée, objectifs très contraignants comme 450 ppm, une contrainte de rythme inférieure ou égale à 0,3 °C.décennie¹, etc.) exerce une attraction forte sur les politiques climatiques de précaution en se traduisant par des recommandations en faveur d'efforts très intenses, proches du *pire des cas*, et ce dès les premières décennies du siècle. Ces trajectoires d'abattement très précautionneuses induisent donc des regrets significatifs dès lors que le pire ne se réalise pas. Que deviennent ces analyses quand on les transfère dans un formalisme coût-bénéfice : l'existence d'un arbitrage entre niveau effectif de protection de l'atmosphère et du climat et coût de cette action conduit-elle à relâcher les efforts de court-terme (avant l'arrivée d'information), à relâcher les efforts de long-terme (comme à la section précédente, en univers certain) ?; l'apprentissage et la date à laquelle l'incertitude est résolue sont-ils une fois encore des paramètres déterminants du problème de décision sous incertitude ?; quelles sont les valeurs de l'information associés aux paramètres incertains ?

C'est ce que nous allons examiner dans cette section en prenant en compte d'une part, les incertitudes sur la dynamique du climat (incertitude objective sur la sensibilité du climat, qui s'impose à tous) et d'autre part, du point de vue d'un planificateur central, les incertitudes sur les préférences de la population vis à vis du régime climatique. Le protocole de calibrage permet de révéler les préférences qui correspondent à un objectif (en termes d'amplitude à long-terme du réchauffement) jugé favorable. Elles dépendent, on l'a vu, des croyances de chacun sur l'étendue des impacts d'un changement climatique donné et de la manière dont nous en serons affectés - croyances qui font opter pour des seuils de réchauffement plus ou moins élevés -, de la réponse du climat à un sentier d'émissions donné (ici, la sensibilité du climat rend compte de cet ensemble de mécanismes), des trajectoires d'émissions de GES et des coûts d'abattement associés, de jugements de valeurs sur nos liens de solidarité avec les générations futures (c'est le rôle de la préférence pure pour le présent que de rendre compte de cela). Ainsi, sachant que nous menons nos simulations pour un unique scénario de référence et une seule fonction de coût, on peut révéler, pour chaque valeur de la sensibilité du climat et de la préférence pure pour le présent, les préférences qui font opter pour un objectif donné de réchauffement, c'est à dire qui correspondent aux croyances de chacun sur ce que signifie un changement climatique *dangereux*.

On est donc en mesure de croiser (voir Figure V-9) croyances sur les risques climatiques (qui sont représentées par différents seuils de réchauffement jugés favorables, c'est à dire en coût-bénéfice des préférences plus ou moins fortes pour la stabilité du climat) et incertitudes sur la dynamique du climat (sur la sensibilité du climat). Dans un premier temps, nous étudierons les politiques climatiques optimales en présence d'incertitude sur la sensibilité du climat (trois valeurs : +2,5°C ; +3,5°C et +4,5°C) pour des préférences correspondant à un seuil désirable de réchauffement de +2°C, puis dans un second temps, les politiques climatiques optimales en présence d'incertitude sur les préférences des populations, pour trois seuils de réchauffement souhaitables, +1°C, +2°C et +3°C, tandis que la sensibilité du climat est fixée à une valeur de 3,5°C.

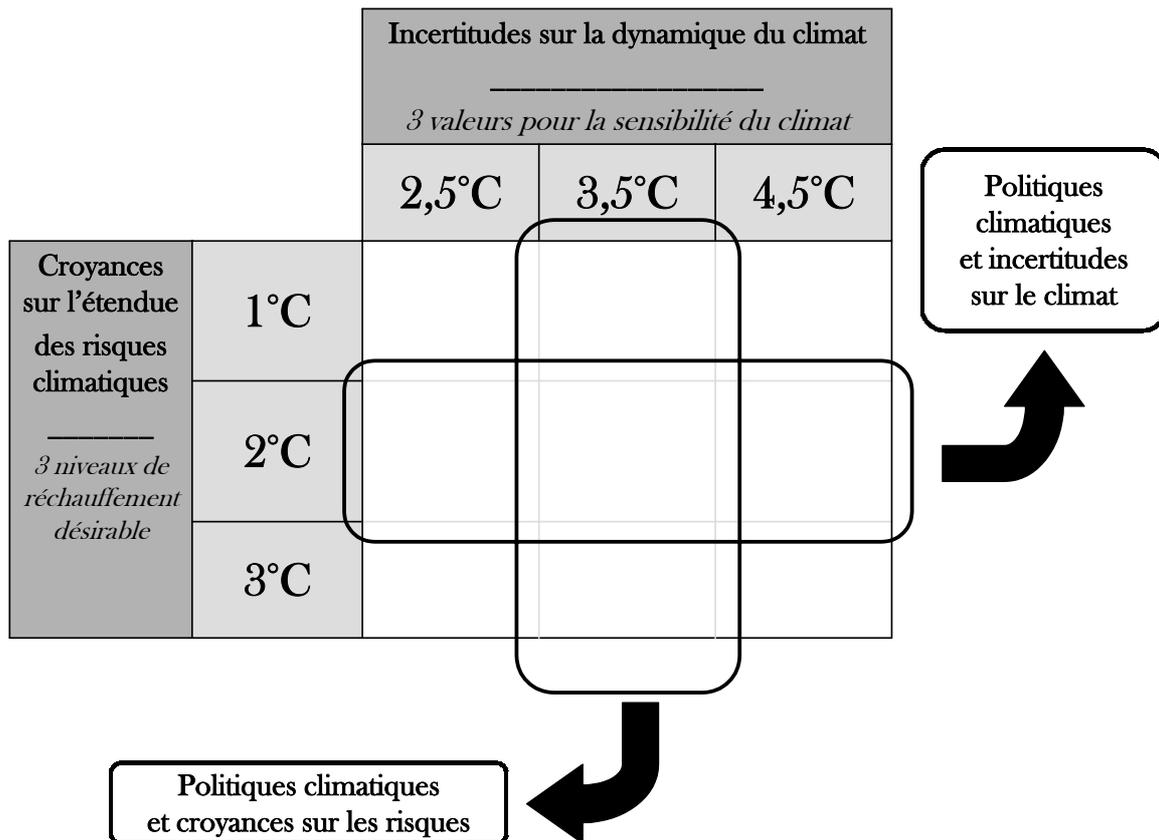


Figure V-9. Croyances sur les risques climatiques et incertitudes sur la sensibilité du climat.

III.1. Politiques climatiques et incertitudes sur le climat : résultats du modèle *RESPONSE_II*

Pour représenter une situation de recherche de politique climatique optimale en présence d'incertitude sur la sensibilité du climat avec arrivée d'information sur ce paramètre, nous avons reformulé le modèle *RESPONSE_II* (voir Encadré V-2).

La sensibilité du climat est incertaine et on considère, comme au chapitre III, trois états du monde (s), caractérisés par la valeur que peut prendre ce paramètre, respectivement $\{+2,5^\circ\text{C} ; +3,5^\circ\text{C} ; +4,5^\circ\text{C}\}$. A ces trois états du monde, sont associées les probabilités subjectives *ex ante* (p). Pour tester la sensibilité des résultats de *RESPONSE_II* à cette distribution de probabilités, nous avons repris les quatre jeux du chapitre III, à savoir une distribution *pessimiste* $\{1/6 ; 1/6 ; 2/3\}$, une distribution *neutre* $\{1/3 ; 1/3 ; 1/3\}$, une distribution *centrée* $\{1/6 ; 2/3 ; 1/6\}$ et une distribution *optimiste* $\{2/3 ; 1/6 ; 1/6\}$. Comme au chapitre III, nous considérons que l'incertitude sur la sensibilité du climat peut être levée au début de chaque décennie du siècle (t_{info} compris en 2000 et 2100), en incluant deux cas polaires, information parfaite ($t_{info}=1990$) et incertitude complète ($t_{info}=2300$, l'horizon du modèle).

Pour un même niveau désirable de réchauffement (ici, +2°C), les préférences des individus vis à vis du régime climatique dépendent de la valeur de la sensibilité du climat. On a vu que l'élasticité climat de la fonction d'utilité (β) est en effet croissante selon la sensibilité du climat : plus cette dernière prend une valeur élevée, plus le CAP des individus croît et justifie le volume d'efforts plus important qui doivent être entrepris pour respecter un même niveau désirable de réchauffement. On fait l'hypothèse que le planificateur central connaît le niveau d'efforts que la société est prête à consentir en fonction de la valeur de la sensibilité du climat⁶ mais il ne peut ajuster ce niveau d'efforts que lorsqu'il connaît les caractéristiques de la dynamique du climat : l'élasticité climat de la fonction d'utilité, β , est donc également incertaine et son incertitude suit les caractéristiques de l'incertitude sur la sensibilité du climat. $\bar{\theta}$, le seuil absolu de réchauffement au-delà duquel le changement climatique est perçu comme indubitablement dangereux, est fixé à +4°C.

Encadré V-2. Politiques climatiques de précaution en présence d'incertitude sur la sensibilité du climat : évaluation à l'aide du modèle coût-bénéfice RESPONSE_II.

Le code du modèle est disponible en annexe.

Fonction objectif : maximisation de l'utilité inter-temporelle des générations successives

$$\text{Max}_{Ab_t^s} \sum_s p_s \sum_{t=1990}^{2300} N_t \left\{ \ln \left(c \frac{Y_t - f(Ab_t^s, Ab_{t-1}^s, t)}{N_t} \right) \left(\bar{\theta} - (\theta_{At}^s(t) - \theta_{At}^s(1990)) \right)^{\beta^s} \right\} e^{-\eta(t-1990)}$$

Contrainte non anticipative

$$\forall t \leq t_{\text{info}}, \forall (s, s') \in S, \quad Ab_t^s = Ab_t^{s'}$$

Emissions de référence de CO₂ (em_t)

données exogènes, tirées du scénario de référence (A1-m).

Cycle du carbone

$$\begin{pmatrix} A_{t+1}^s \\ B_{t+1}^s \\ O_{t+1}^s \end{pmatrix} = C_{\text{trans}} \cdot \begin{pmatrix} A_t^s \\ B_t^s \\ O_t^s \end{pmatrix} + \delta \cdot (1 - Ab_t^s) \cdot em_t \cdot \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}$$

Evolution de la température moyenne globale

$$\begin{bmatrix} \theta_{At}^s(t+1) \\ \theta_{Oc}^s(t+1) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 - \sigma_1(\lambda^s + \sigma_2) & \sigma_1\sigma_2 \\ \sigma_3 & 1 - \sigma_3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \theta_{At}^s(t) \\ \theta_{Oc}^s(t) \end{bmatrix} + \sigma_1 \begin{bmatrix} F_{2x} \log(A_t^s / A_{Pl}) / \log 2 \\ 0 \end{bmatrix}$$

⁶ Par exemple, plus le changement climatique a de grandes chances d'être de grande ampleur (sensibilité du climat élevée) avec des risques croissants, plus les populations seront prêtes à limiter la dérive du climat en deçà d'un seuil donné.

A partir de ces spécifications pour ce qui concerne l'incertitude et l'arrivée d'information, *RESPONSE_II* a été reformulé comme suit, les formes fonctionnelles et les valeurs des paramètres précédemment présentées restant identiques. L'objectif du planificateur central est de maximiser l'espérance sur les trois états du monde de l'utilité inter-temporelle⁷ des générations successives, dont le bien-être dépend d'une part de la consommation privée *per capita* nette des coûts d'abattement et d'autre part, de la qualité du climat, mesurée selon l'augmentation de la température moyenne globale de l'atmosphère. Ce planificateur cherche à résoudre un jeu de trois problèmes parallèles, chacun indicé par l'état du monde auquel il correspond (notamment, la fonction objectif - via le paramètre β - et l'évolution de la température moyenne globale - via le paramètre λ - dépendent de la valeur de la sensibilité du climat). Ces trois problèmes, pondérés par leur probabilité subjective d'occurrence, sont considérés par le planificateur dans la fonction objectif. Avant l'arrivée d'information, on impose que le niveau d'abattement soit identique quel que soit l'état du monde ; après l'arrivée d'information, ces niveaux peuvent se différencier selon les configurations propres à chaque état du monde.

Examinons dans un premier temps, la politique climatique optimale pour une distribution de probabilités *a priori* centrée (voir Figure V-10). On se rappelle qu'en univers certain (voir la section précédente), les trajectoires d'émissions pour satisfaire un même objectif désirable de réchauffement (ici, +2°C) diffèrent beaucoup selon que la sensibilité du climat a une valeur plus ou moins élevée (voir les courbes pointillé gris clair) : sur le siècle, les efforts d'abattement passent dans l'ensemble du simple à plus du quadruple pour les deux valeurs extrêmes de la sensibilité du climat. Maintenant, quels efforts implique dans un cadre coût-bénéfice une politique de précaution en présence d'incertitude sur la sensibilité du climat ?

Intéressons-nous en premier lieu à la politique climatique en incertitude complète (courbe pointillé noir). On peut constater, qu'à la différence des résultats du chapitre III (analyse coût-efficacité avec incertitude sur la sensibilité du climat pour un seuil de réchauffement de +2°C), la trajectoire optimale d'émissions est ici relativement proche de la trajectoire en certain correspondant à l'espérance de la sensibilité du climat (+3,5°C) et certainement très éloignée du pire des cas certains (+4,5°C). On entreprend bien sûr un peu plus d'efforts puisque le planificateur prend en compte l'éventualité de la réalisation d'une situation défavorable (assortie d'ailleurs d'un CAP pour la protection du climat plus important) mais en aucun cas, la trajectoire optimale d'émissions en incertitude complète n'est confondue avec le pire des cas certains comme au chapitre III.

Si l'on examine maintenant les trajectoires optimales avec arrivée d'information, on peut constater qu'avant la date de résolution des incertitudes, ces trajectoires sont presque confondues avec la trajectoire optimale en incertitude complète (elles lui sont seulement très légèrement supérieures) et ceci que l'information soit disponible en 2020 ou en 2080. Ainsi, à la différence des résultats au chapitre IV, savoir (ou espérer) que l'on connaîtra la valeur avérée de la sensibilité du climat à une certaine date n'a pas d'influence sur la décision optimale avant cette date : on n'observe pas de flexibilité (dans le sens d'un relâchement des efforts) associée au processus d'acquisition future d'information pour la décision avant la résolution des incertitudes. L'apprentissage n'est donc pas un élément déterminant du processus de décision à court-terme. De manière générale, il reste bien sûr toujours souhaitable de réduire les incertitudes pour éviter les regrets liés au fait que les politiques climatiques ne peuvent pas être ajustées aux états du monde.

⁷ Pour cette section, η , la préférence pure pour le présent est fixée à 3 *%.an*⁻¹.

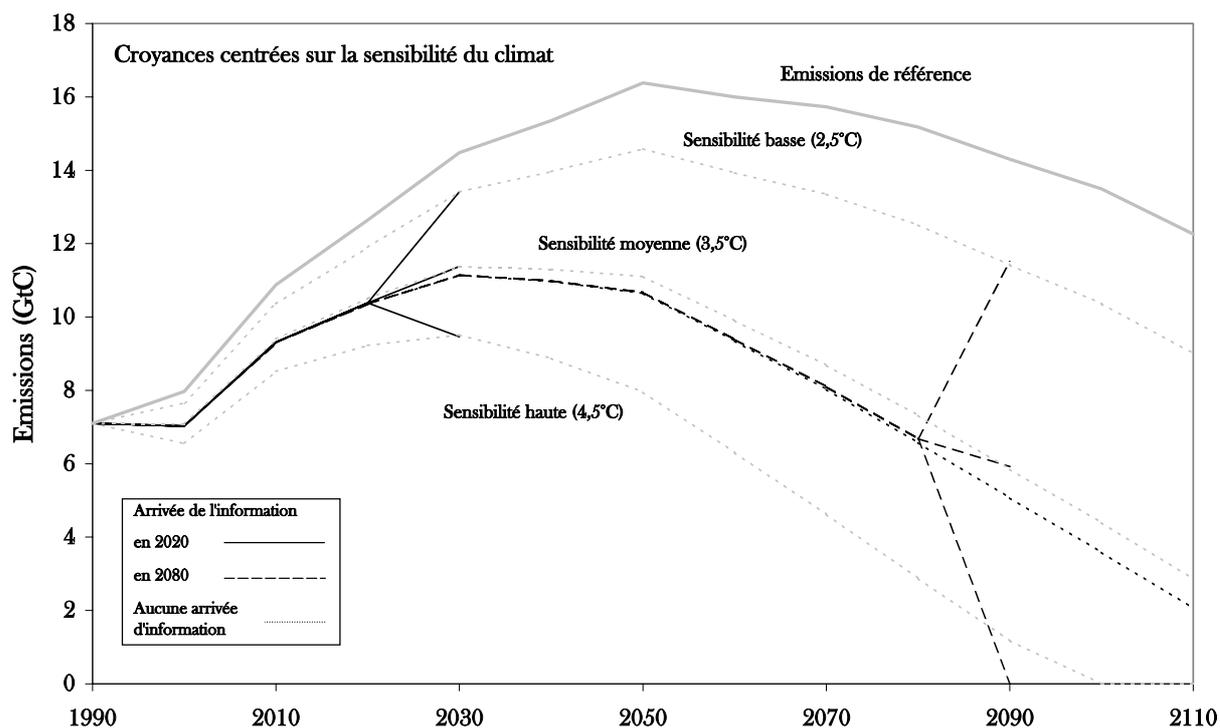


Figure V-10. Politique climatique optimale en présence d'incertitude sur la sensibilité du climat.

Trajectoires d'émissions obtenues dans un cadre coût-bénéfice avec une 'Préférence pour la stabilité du climat' en présence d'incertitude sur la sensibilité du climat. On a rajouté les trajectoires en information parfaite (courbes pointillées gris clair).

Après la date de résolution des incertitudes, les trajectoires optimales d'émissions s'ajustent à l'état du monde correspondant. On peut observer que dans les cas où la sensibilité du climat vaut 2,5°C et 3,5°C, elles rejoignent les trajectoires d'émissions des cas certains leur correspondant et on n'assiste pas à un relâchement des efforts (comme c'est le cas en coût-efficacité) bien qu'on ait entrepris beaucoup plus d'efforts que nécessaire auparavant (c'est par exemple très net pour la trajectoire correspondant à une sensibilité du climat valant finalement 2,5°C avec arrivée d'information en 2080 seulement). Quand la sensibilité du climat vaut 4,5°C, on observe en revanche un renforcement des efforts (par rapport à la trajectoire en certain lui correspondant) pour rattraper tous ceux qui n'ont pas été entrepris avant l'arrivée d'information.

A la différence des analyses en coût-efficacité au chapitre IV - où seul peut s'exprimer un regret économique car on préserve toutes les options environnementales, mêmes les plus contraignantes⁸ -, l'équilibre entre les deux regrets - celui, économique, d'avoir entrepris 'trop' d'efforts compte tenu de la valeur que prend réellement la sensibilité du climat et celui, environnemental, de n'avoir pas entrepris 'assez' d'efforts pour protéger l'atmosphère quand la sensibilité du climat prend de fait une valeur élevée - peut s'exercer dans un cadre coût-bénéfice car on y autorise cette fois l'arbitrage entre niveau de protection de l'atmosphère et du climat et

⁸ Ce qui a d'ailleurs pour effet d'induire un regret économique d'autant plus important que l'information arrive tardivement.

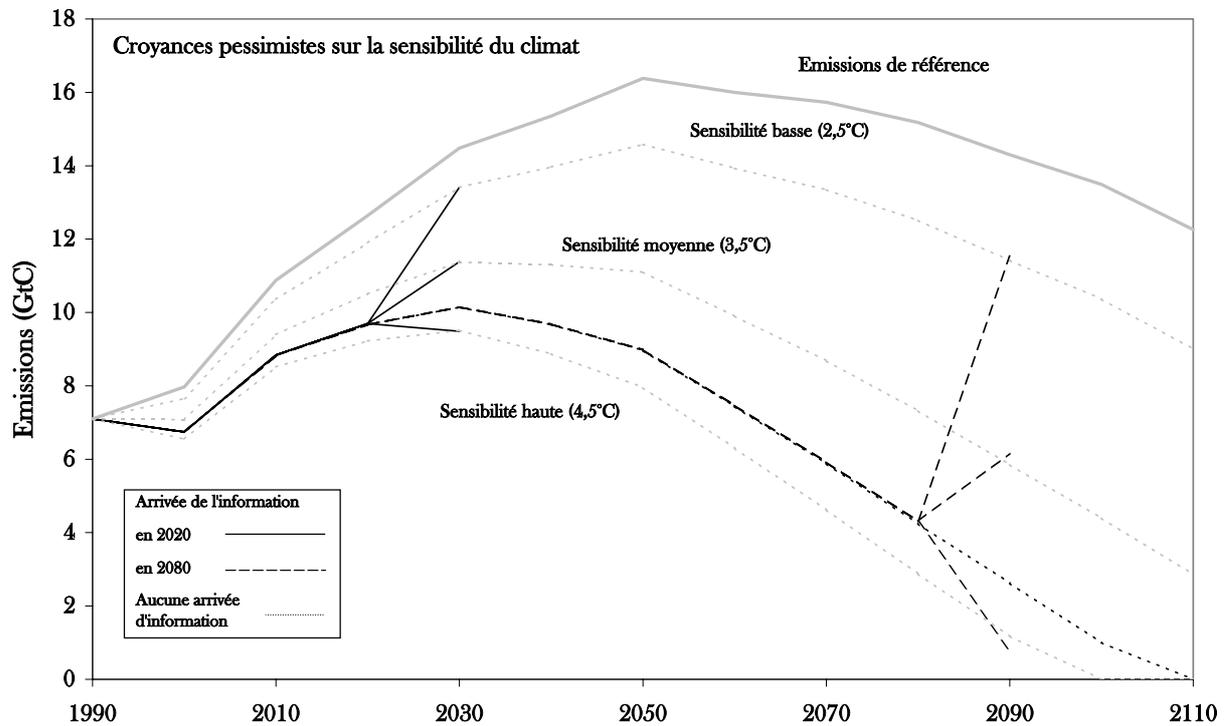
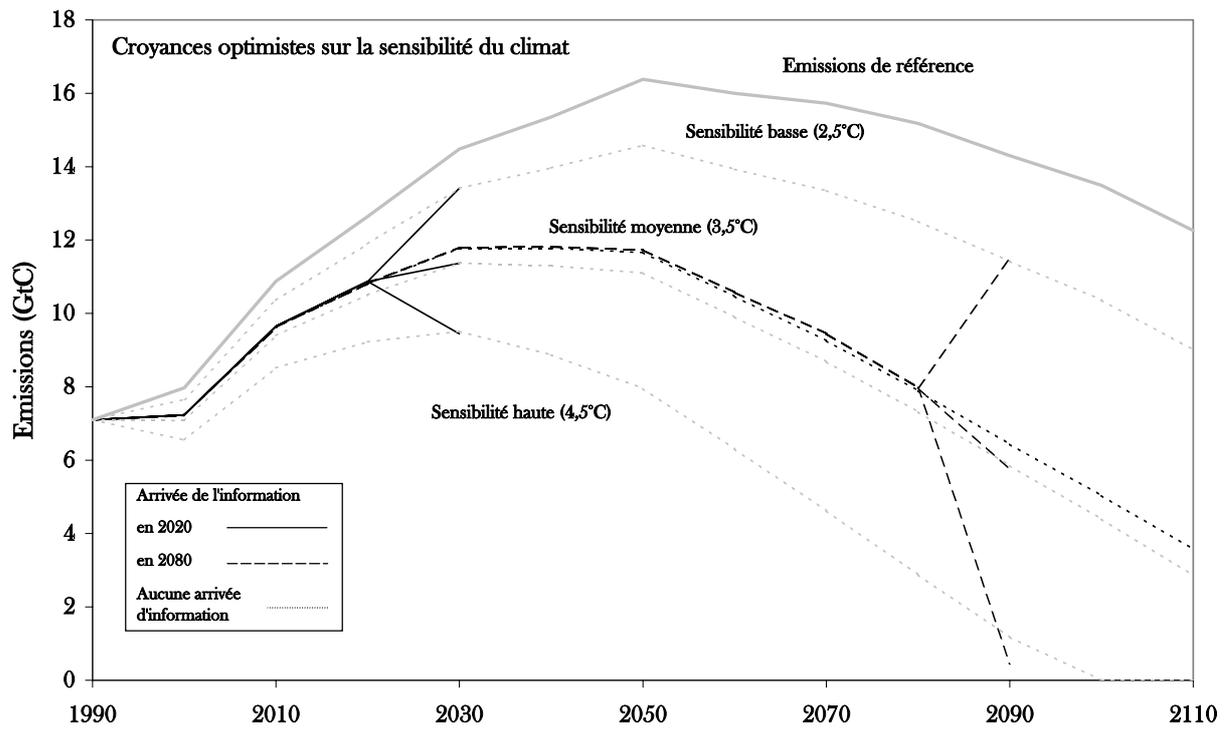


Figure V-11. Comme pour la Figure V-10 mais avec des croyances optimistes (en haut) et pessimistes (en bas).

coûts des efforts pour atteindre un tel niveau. En définitive, quand on a entrepris trop d'efforts au détriment de la consommation si la sensibilité du climat vaut finalement $2,5^{\circ}\text{C}$ ou $3,5^{\circ}\text{C}$, on s'est certes écarté de l'optimum social et de la trajectoire d'émissions lui correspondant dans ce cas mais la perte d'utilité qui accompagne ce surcroît d'efforts du fait du sacrifice de consommation est contrebalancée par des gains d'utilité provenant du surcroît de protection du climat. A l'opposé, s'il appert que la sensibilité du climat vaut finalement $+4,5^{\circ}\text{C}$, les efforts d'abattement sont renforcés : il n'y a pas de regret économique (sauf si le degré d'inertie socio-économique était très élevé et qu'on observait une accélération notable des efforts) mais il y a un regret environnemental (compte tenu des préférences avérées vis à vis de la stabilité du climat, on n'a pas entrepris assez d'efforts auparavant). Ces deux comportements (qu'on ne relâche pas les efforts au-delà des trajectoires d'émissions optimales en univers certain en cas de 'bonne' nouvelle concernant la dynamique du climat et qu'à l'inverse, les efforts sont poursuivis sinon) montre toute l'importance pour la décision de la préférence pour la stabilité du climat et du regret environnemental auquel elle donne naissance. On a l'intuition que c'est celui-ci qui l'emporte sur le regret économique en examinant la position de la trajectoire d'émission en présence d'incertitude : entre le pire des cas certains et le cas certain central, plus proche du second que du premier.

Comment évoluent ces résultats pour les autres distributions de probabilités *a priori* sur la sensibilité du climat ? Dans tous les cas (voir la Figure V-11, où nous avons représenté seulement les deux croyances extrêmes : *optimiste* et *pessimiste*), on retrouve que l'apprentissage n'est pas un facteur déterminant pour le processus de décision : on peut constater qu'avant la date de résolution des incertitudes, les trajectoires optimales avec arrivée d'information sont presque confondues avec la trajectoire optimale en incertitude complète (elles lui sont seulement très légèrement supérieures) et ceci que l'information soit disponible en 2020 ou en 2080. En revanche, concernant la position des trajectoires d'émissions avec arrivée d'information (et dans un cas extrême, de la trajectoire en incertitude complète), on n'observe plus systématiquement qu'elles sont encadrées par les trajectoires correspondant au pire des cas certains et au cas central certain. Plus précisément, quand on parcourt les distributions de probabilités de *pessimiste* à *optimiste*, en passant par *neutre* puis *centré* (c'est à dire en donnant de moins en moins de poids au pire des cas - sensibilité du climat = $4,5^{\circ}\text{C}$ - et en cas d'égalité (*centré* et *optimiste*) en déplaçant l'espérance vers de plus faibles valeurs de la sensibilité du climat), on peut observer que les trajectoires d'émissions s'éloignent progressivement du pire des cas certains et se rapprochent du cas central certain. Elles lui restent cependant inférieures sauf pour la distribution de probabilités *optimiste* où elles lui deviennent supérieures (tout en en restant proches), ce que l'on n'observe pas en coût-efficacité. Dans ce dernier cas donc, ceci suggère que le regret économique, cette fois, l'emporte même si la préférence pour la stabilité du climat et le regret environnemental qu'elle implique pèsent encore sur la décision : l'arbitrage entre niveau de protection de l'atmosphère et du climat et coûts des efforts pour atteindre un tel niveau joue dans le sens d'une inflexion des efforts, qui reste cependant limitée sous l'effet de la préférence pour la stabilité du climat.

Calculons la valeur de l'information (EVPI) associée à la sensibilité du climat : c'est une mesure de la manière dont croissent les regrets de ne pas avoir l'information aujourd'hui et de n'en disposer qu'à partir de t_{info} . Comme au chapitre IV, elle est évaluée comme la différence entre la moyenne (pondérée par les probabilités *ex ante* sur la sensibilité du climat) de l'objectif du planificateur en univers certain (cas *Learn then Act*) et l'objectif du planificateur en présence d'incertitude avec arrivée d'information sur ce paramètre à la date t_{info} (cas *Act then Learn*). En reprenant les notations du modèle *RESPONSE_II*, on a :

$$EVPI(t_{info}) = \underbrace{\left(\sum_s p_s \sum_{t=1990}^{2300} N_t \left\{ \ln \left(c \frac{Y_t - f(Ab_{LTA,t}^s, Ab_{LTA,t-1}^s, t)}{N_t} \right) (\bar{\theta} - (\theta_{At}^s(t) - \theta_{At}^s(1990)))^{\beta^s} \right\} e^{-\eta(t-1990)} \right)}_{\text{Learn then Act policy}} \dots$$

$$- \underbrace{\left(\sum_s p_s \sum_{t=1990}^{2300} N_t \left\{ \ln \left(c \frac{Y_t - f(Ab_{ATL(t_{info}),t}^s, Ab_{ATL(t_{info}),t-1}^s, t)}{N_t} \right) (\bar{\theta} - (\theta_{At}^s(t) - \theta_{At}^s(1990)))^{\beta^s} \right\} e^{-\eta(t-1990)} \right)}_{\text{Act then Learn policy}}$$

avec $Ab_{LTA,t}^s$ séquence optimale d'abatement, l'état du monde étant s . C'est à dire la trajectoire optimale obtenue en univers certain, l'état du monde étant s .
 $Ab_{ATL(t_{info}),t}^s$ séquence optimale d'abatement en décision séquentielle, l'état du monde s étant révélé à la date t_{info} .

Nous avons ainsi calculé la valeur de l'information sur la sensibilité du climat selon sa date d'arrivée, pour les quatre distributions de probabilités utilisées (voir Figure V-12). Comme on peut le constater d'après l'expression qui donne la valeur de EVPI, cette grandeur se mesure en points d'utilité. A titre de comparaison, la valeur de la moyenne (pondérée par les probabilités *ex ante* sur la sensibilité du climat) de l'objectif du planificateur en univers certain (le premier terme de la différence) s'élève à quelques 230 000 points d'utilité ; la valeur de l'information n'est donc ici qu'une quantité très marginale : on a vu que l'effet de l'apprentissage est nul et que dans l'ensemble, les deux regrets s'équilibrent. Rappelons qu'en mode coût-efficacité, la valeur de l'information sur la sensibilité du climat pouvait représenter jusqu'au double de la moyenne (pondérée par les probabilités *ex ante* sur la sensibilité du climat) de l'objectif du planificateur en univers certain, révélant par là combien dans ce formalisme il s'agit d'un paramètre décisif pour la décision.

On retrouve bien que, compte tenu du peu d'effet de l'apprentissage sur la décision sous incertitude, la valeur de l'information croît de manière régulière : il n'y pas de fenêtre d'opportunité pendant laquelle acquérir l'information (ou accélérer le processus d'acquisition) est tout spécialement intéressant compte tenu des flexibilités qu'elle permettrait. On peut vérifier d'ailleurs que les profils de l'évolution de EVPI (en % par rapport à la valeur à l'infini) sont similaires. Il est difficile en revanche d'interpréter les niveaux à l'infini de EVPI dans chacun des cas, puisqu'il faut prendre en compte les différents regrets et comment ils sont affectés par l'absence d'information (ce que mesure la valeur à l'infini). On peut simplement remarquer que cette grandeur est sensible à la distribution de probabilités sous-jacente (presque du simple au double), ce dont on avait l'intuition à la section précédente.

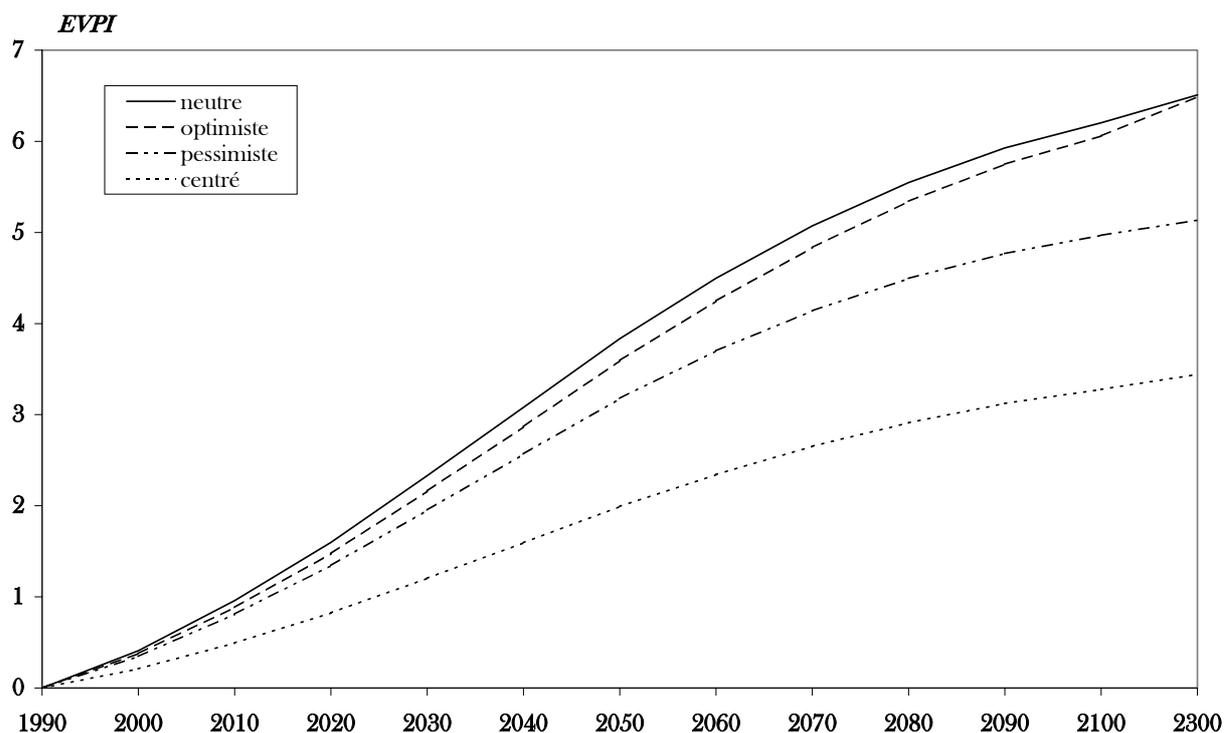


Figure V-12. Valeur de l'information sur la sensibilité du climat en fonction de sa date d'arrivée pour différentes croyances sur ce paramètre.

En conclusion, en introduisant une préférence pour la stabilité du régime climatique pour évaluer les politiques climatiques non plus dans un cadre coût-efficacité mais dans un cadre coût-bénéfice, on peut constater que les stratégies de précaution en présence d'incertitude sur la sensibilité du climat sont moins rigoureuses (et tout spécialement, pour le niveau d'efforts à court-terme) : on n'observe plus d'attraction très forte par le pire des cas voire, quand il lui est attaché une probabilité d'occurrence faible, celle-ci disparaît complètement. Un élément d'explication est qu'on adopte non plus une mesure binaire, valant 0 ou l'infini, des bénéfices environnementaux des politiques climatiques mais une mesure continue (et bornée au voisinage du niveau de réchauffement désirable) : la valorisation d'un dépassement de cet objectif et les regrets environnementaux sont donc d'une ampleur beaucoup plus faible. Cependant, même si elle autorise une relative souplesse en terme de niveau d'abattement, la préférence pour le régime climatique actuel reste suffisamment forte pour, après l'arrivée d'information, faire renforcer les efforts en cas de mauvaise nouvelle du côté du climat et les maintenir au moins au niveau du cas certain correspondant sinon.

Par ailleurs, on a pu constater qu'ici le phénomène d'apprentissage n'est pas un élément crucial du problème de décision sous incertitude : il n'y a pas de flexibilité associée à l'arrivée d'information et la valeur de l'information est particulièrement faible. On doit se rappeler d'une part, que étant donné qu'il n'y a plus d'attraction très forte du pire des cas, les regrets économiques de n'avoir pu ajuster la politique climatique optimale du fait de l'incertitude sont moins élevés que dans une approche coût-efficacité et d'autre part, que toute surprotection de l'atmosphère et du climat (même si elle n'est pas optimale) se traduit tout de même par une amélioration de l'utilité. Ne pas disposer de l'information implique donc des regrets nets finalement relativement faibles.

III.2. Politiques climatiques et croyances sur les risques climatiques : résultats du modèle *RESPONSE_II*

On va examiner maintenant quelles politiques climatiques de précaution proposerait un planificateur central compte tenu d'une méconnaissance des préférences des individus : quel seuil de réchauffement sera jugé finalement désirable par les populations ? On en a vu un certain nombre de raisons au chapitre II (comment, par exemple, au-delà des incertitudes sur les impacts du changement climatique et du degré d'aversion au risque des populations en face de cette incertitude très grande, les préférences individuelles et collectives face au risque climatique résultent de processus médiatiques) et on ne peut pas exclure qu'un certain temps s'écoulera avant d'atteindre une stabilisation de l'opinion sur ces questions.

A cette fin nous avons reformulé le modèle *RESPONSE_II* comme suit (voir Encadré V-3). Dans cette section, la demande sociale qui est adressée au planificateur central est incertaine. En pratique, on considère trois niveaux de réchauffement désirable, $\{+1^{\circ}\text{C} ; +2^{\circ}\text{C} ; +3^{\circ}\text{C}\}$, sur lesquels, on l'espère, un relatif consensus finira par émerger. Ils définissent trois états du monde (s), caractérisés par la valeur que peut prendre le paramètre β , l'élasticité qualité du climat de la fonction d'utilité, respectivement $\{0,01251 ; 0,00178 ; 0,00008\}$. A ces trois états du monde, sont associées les probabilités subjectives *ex ante* (p) et pour tester la sensibilité des résultats de *RESPONSE_II* à cette distribution de probabilités, nous utilisons les quatre jeux suivants : une distribution *pessimiste* $\{2/3 ; 1/6 ; 1/6\}$, une distribution *neutre* $\{1/3 ; 1/3 ; 1/3\}$, une distribution *centrée* $\{1/6 ; 2/3 ; 1/6\}$ et une distribution *optimiste* $\{1/6 ; 1/6 ; 2/3\}$. Dans cette perspective, ces distributions de probabilités représentent les différentes fractions de la population qui défendent un objectif désirable donné : de manière générale, cette population est tour à tour pessimiste, neutre (indécise), majoritairement centrée et optimiste. Nous considérons que l'incertitude sur les préférences des populations (le moment où un consensus émerge) peut être levée au début de chaque décennie du siècle (t_{info} compris entre 2000 et 2100), en incluant deux cas polaires, information parfaite ($t_{\text{info}}=1990$) et incertitude complète ($t_{\text{info}}=2300$, l'horizon du modèle).

A partir de ces spécifications pour ce qui concerne l'incertitude et l'arrivée d'information, *RESPONSE_II* a été reformulé comme suit, les formes fonctionnelles et les valeurs des paramètres précédemment présentées restant identiques. L'objectif du planificateur central est de maximiser l'espérance sur les trois états du monde de l'utilité inter-temporelle⁹ des générations successives, dont le bien-être dépend d'une part de la consommation privée *per capita* nette des coûts d'abattement et d'autre part, de la qualité du climat, mesurée selon l'augmentation de la température moyenne globale de l'atmosphère. Ce planificateur cherche à résoudre un jeu de trois problèmes parallèles, chacun indicé par l'état du monde auquel il correspond (notamment, la fonction objectif - via le paramètre β - dépend de la valeur de la demande sociale). Ces trois problèmes, pondérés par leur probabilité subjective d'occurrence, sont considérés par le planificateur dans la fonction objectif. Avant l'arrivée d'information, on impose que le niveau d'abattement soit identique quel que soit l'état du monde ; après l'arrivée

⁹ Comme précédemment, η , la préférence pure pour le présent est fixée à $3\% \text{.an}^{-1}$, et $\bar{\theta}$, le seuil absolu de réchauffement au-delà duquel le changement climatique est perçu comme indubitablement dangereux, à $+4^{\circ}\text{C}$.

d'information, ces niveaux peuvent se différencier selon les contraintes propres à chaque état du monde.

Encadré V-3. Politiques climatiques de précaution en présence d'incertitude sur les préférences de la population vis à vis du climat : évaluation à l'aide du modèle RESPONSE_II.

Le code du modèle est disponible en annexe.

Fonction objectif :

Maximisation de l'utilité inter-temporelle des générations successives

$$\text{Max}_{Ab_t^s} \sum_s p_s \sum_{t=1990}^{2300} N_t \left\{ \ln \left(c \frac{Y_t - f(Ab_t^s, Ab_{t-1}^s, t)}{N_t} \right) \left(\bar{\theta} - (\theta_{At}^s(t) - \theta_{At}^s(1990)) \right)^{\beta^s} \right\} e^{-\eta(t-1990)}$$

Contrainte non anticipative

$$\forall t \leq t_{info}, \forall (s, s') \in S, \quad Ab_t^s = Ab_t^{s'}$$

Emissions de référence de CO₂ (em_t)

données exogènes, tirées du scénario de référence (A1-m).

Cycle du carbone

$$\begin{pmatrix} A_{t+1}^s \\ B_{t+1}^s \\ O_{t+1}^s \end{pmatrix} = C_{trans} \cdot \begin{pmatrix} A_t^s \\ B_t^s \\ O_t^s \end{pmatrix} + \delta \cdot (1 - Ab_t^s) \cdot em_t \cdot \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}$$

Evolution de la température moyenne globale

$$\begin{bmatrix} \theta_{At}^s(t+1) \\ \theta_{Oc}^s(t+1) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 - \sigma_1(\lambda + \sigma_2) & \sigma_1\sigma_2 \\ \sigma_3 & 1 - \sigma_3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \theta_{At}^s(t) \\ \theta_{Oc}^s(t) \end{bmatrix} + \sigma_1 \begin{bmatrix} F_{2x} \log(A_t^s / A_{Pl}) / \log 2 \\ 0 \end{bmatrix}$$

Examinons dans un premier temps, la politique climatique optimale pour une croyance *a priori* centrée (voir Figure V-13). On peut constater qu'en univers certain, les trajectoires d'émissions diffèrent beaucoup selon la valeur retenue pour l'objectif désirable de réchauffement (voir les courbes pointillé gris clair) : sur le siècle, les efforts d'abattement entre les deux valeurs extrêmes de la préférence pour la stabilité du climat passent d'un facteur 12 en 2000 à un facteur 4 en 2100. Il s'agit donc d'une incertitude déterminante pour le planificateur et nous allons étudier quels efforts implique la méconnaissance aujourd'hui des préférences de la population.

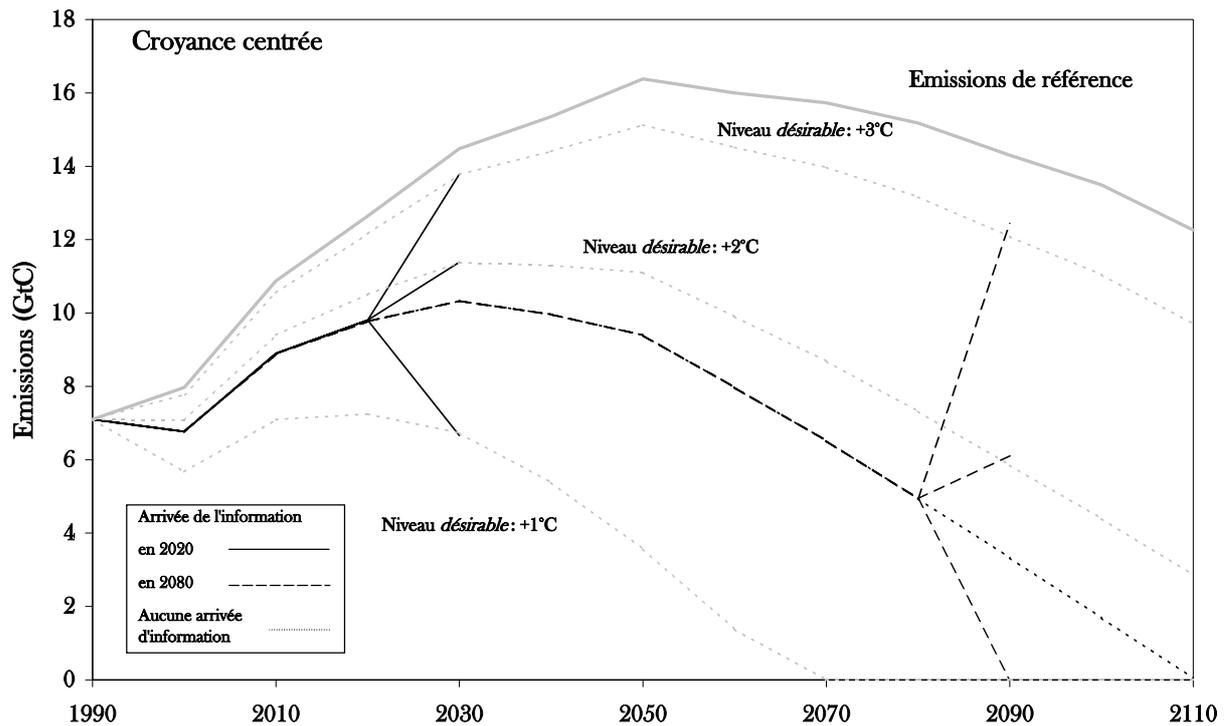


Figure V-13. Politique climatique optimale en présence d'incertitude sur les préférences de la population vis à vis du climat.

Intéressons-nous en premier lieu à la politique climatique en incertitude complète. On peut constater que la trajectoire optimale d'émissions est ici relativement proche de la trajectoire en cas certain correspondant à l'espérance du niveau désirable de réchauffement (+2°C) et certainement très éloignée du pire des cas certains (+1°C). On entreprend bien sûr un peu plus d'efforts puisque le planificateur prend en compte l'éventualité d'un CAP pour la protection du climat plus important mais en aucun cas, la trajectoire optimale d'émissions en incertitude complète n'est confondue avec le pire des cas certains.

Si l'on examine maintenant les trajectoires optimales avec arrivée d'information, on peut constater qu'avant la date de résolution des incertitudes, ces trajectoires sont confondues avec la trajectoire optimale en incertitude complète et ceci que l'information soit disponible en 2020 ou en 2080. L'apprentissage n'est donc pas un élément déterminant du processus de décision à court-terme puisque l'on n'observe pas pour cette période de flexibilité (dans le sens d'un relâchement des efforts) associée au processus d'acquisition future d'information. Il reste bien sûr toujours précieux de résoudre les incertitudes plus tôt que plus tard pour réduire les regrets associés à une politique de précaution, regrets qui croissent avec la date d'arrivée de l'information.

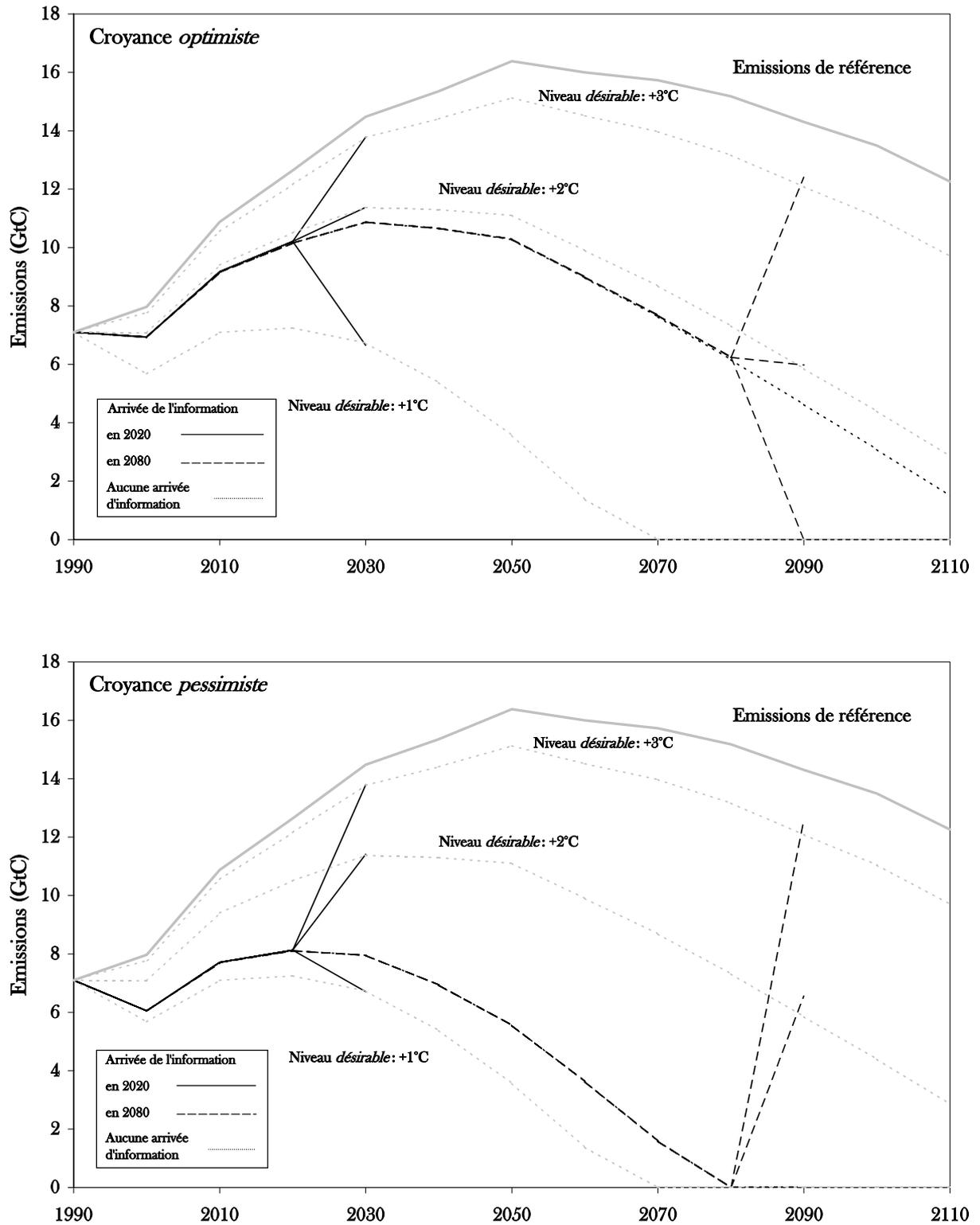


Figure V-14. Comme pour la Figure V-13 mais avec des croyances optimistes (en haut) et pessimistes (en bas).

Comment évoluent ces résultats pour les autres distributions de probabilités *a priori* sur la sensibilité du climat ? Dans tous les cas (voir Figure V-15 pour les deux croyances extrêmes : *optimiste* et *pessimiste*), on retrouve que l'apprentissage n'est pas un facteur déterminant pour le processus de décision en présence d'incertitude : on peut constater qu'avant la date de résolution des incertitudes, les trajectoires optimales avec arrivée d'information sont presque confondues avec la trajectoire optimale en incertitude complète (elles lui sont seulement très légèrement supérieures) et ceci que l'information soit disponible en 2020 ou en 2080. De même, dans tous les cas, concernant la position des trajectoires d'émissions avec arrivée d'information (et dans un cas extrême, de la trajectoire en incertitude complète), on observe systématiquement que les trajectoires d'émissions sont encadrées par les trajectoires du pire des cas certains et du cas central certain. Plus précisément, quand on parcourt les distributions de probabilités de *pessimiste* à *optimiste*, en passant par *neutre* puis *centré* (c'est à dire en donnant de moins en moins de poids au pire des cas - sensibilité du climat = 4,5°C - et en cas d'égalité (*centré* et *optimiste*) en déplaçant l'espérance vers de plus faibles valeurs de la sensibilité du climat), on peut observer que les trajectoires d'émissions s'éloignent progressivement du pire des cas certains et se rapprochent du cas central ; elles lui restent cependant toujours inférieures.

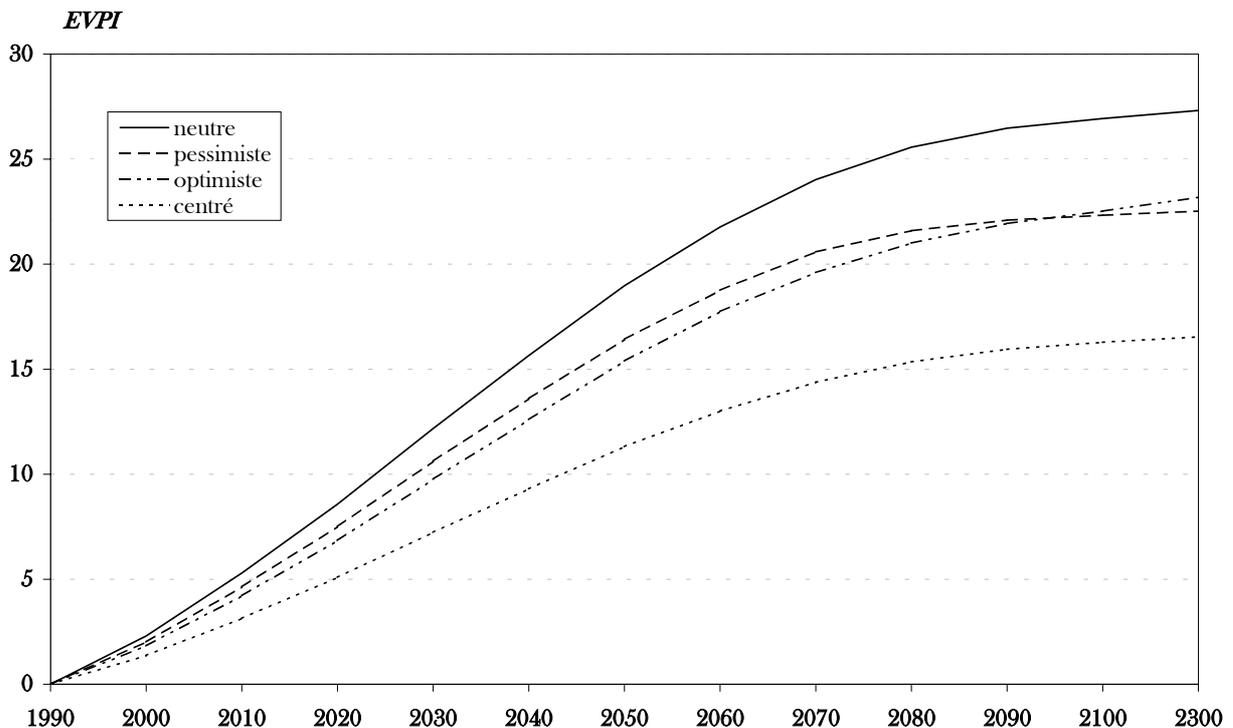


Figure V-15. Valeur de l'information sur l'élasticité climat de la fonction d'utilité (β) en fonction de sa date d'arrivée pour différentes croyances sur ce paramètre.

Calculons la valeur de l'information (EVPI) associée à la révélation des préférences des individus pour la stabilité du climat (ou comme on veut, un indice mesurant l'opportunité de l'émergence plus ou moins tardive d'un consensus sur l'objectif désirable des politiques climatiques). C'est ce qui est représenté Figure V-15, où nous avons calculé la valeur de l'information sur le paramètre β selon sa date d'arrivée, pour les quatre distributions de probabilités utilisées. A nouveau, on peut constater qu'il s'agit d'une grandeur très marginale

(entre 15 et 30 points d'utilité à l'infini) à comparer aux quelques 230 000 points de la valeur de la moyenne (pondérée par les probabilités *ex ante* sur la sensibilité du climat) de l'objectif du planificateur en univers certain.

Elle est toutefois beaucoup plus importante que la valeur de l'information sur la sensibilité du climat, calculée à la section précédente : dans l'ensemble, quelle que soit la distribution de probabilités à laquelle on se réfère, le ratio entre les valeurs d'EVPI à l'infini est presque toujours supérieur à 4,2 (il vaut 3,6 pour des croyances optimistes) et si l'information arrive en 2000, il est beaucoup plus important, presque toujours supérieur à 5,6 (sauf pour les croyances optimistes où il vaut 4,9). Autrement dit, l'information sur les préférences est toujours plus précieuse que l'information sur la sensibilité du climat, et ce encore plus à court-terme. On peut remarquer que dans ce cas-ci, le regret économique est certainement un peu plus important que précédemment : après l'arrivée d'information, les efforts sont relâchés au-delà des trajectoires d'émissions en certain correspondant à l'état du monde avéré quand la sensibilité du climat vaut 2,5°C ou 3,5°C, ce qui n'était pas le cas précédemment. La valeur de l'information est donc mécaniquement plus importante.

Dans une perspective plus générale, ces résultats sont différents de ceux que l'on obtient dans un cadre coût-efficacité (voir la figure IV-33) où à court-terme, c'est l'information sur la sensibilité du climat qui est plus précieuse que l'information sur la contrainte sur l'amplitude du réchauffement et où à l'infini, c'est certes la valeur de l'information sur la contrainte d'amplitude qui est supérieure à celle sur la sensibilité du climat, mais seulement dans un rapport légèrement supérieur à 1,5.

En conclusion, on voit donc apparaître deux différences importantes entre les recommandations pour les politiques climatiques de précaution issues d'un cadre coût-efficacité et d'un cadre coût-bénéfice.

En comparaison du formalisme coût-efficacité, dans une analyse coût-bénéfice avec 'Préférence pour la stabilité du climat', on peut observer que les politiques de précaution impliquent des efforts de réduction des émissions moins rigoureux du fait de l'arbitrage, maintenant autorisé, entre sacrifice de consommation et amplitude du réchauffement. Ce relâchement des efforts se traduit par un dépassement temporaire de l'objectif climatique jugé désirable si la pire des configurations (sensibilité du climat élevée, +4,5°C, ou préférence forte faisant opter pour un seuil de réchauffement autour de +1°C) venait à se réaliser : au maximum ce dépassement est de l'ordre de 0,6°C si l'information sur la sensibilité du climat nous parvient aussi tard qu'en 2080 et de 0,8°C si un consensus sur les préférences des populations vis à vis du climat n'émergeait pas avant cette même date. Ces chiffres peuvent sembler importants mais doivent être mis en rapport avec le scénario de référence qui implique lui respectivement un dépassement en 2080 de +1°C dans le premier cas et de +1,4°C dans le second. Autrement dit, en présence de mauvaises nouvelles du côté du climat, on préférera temporairement faire face à une évolution du climat considérée aujourd'hui comme défavorable plutôt qu'adopter des mesures extrêmement coûteuses. Cependant, la 'Préférence pour la stabilité du climat' reste assez forte pour conduire à une poursuite des efforts de réduction des émissions de manière à ne pas trop laisser dériver la machine climatique et suffisamment forte de manière générale pour que la politique de précaution implique des efforts d'abattement plus intenses que ceux observés dans le cas central certain.

Sachant que l'on n'observe plus en mode coût-bénéfice d'attraction par le pire des cas certains, les regrets associés à une politique de précaution ne sont plus aussi importants qu'en mode coût-efficacité, et ce d'autant plus que toute sur-protection de l'atmosphère (qui induit un regret économique) est également à l'origine d'un gain d'utilité (ce qui n'apparaît pas en mode coût-efficacité). L'incertitude n'est donc pas un paramètre déterminant du problème de décision et les valeurs de l'information associées aux paramètres incertains sont donc beaucoup plus faibles que pour une analyse coût-efficacité. On peut constater enfin que l'incertitude sur les préférences (autrement dit les croyances sur les risques) est beaucoup plus importante, au moins d'un facteur 4, que l'incertitude sur la dynamique du climat. On retrouve ici un des résultats établis par [Lave et Dowlatabadi, 1993] (voir *infra* chapitre II § II-2), selon lequel les attitudes psychologiques déterminent davantage les choix politiques que la qualité des informations à disposition.

IV. De la 'Préférence pour la stabilité du climat' aux aménités prodiguées par l'environnement que menace le changement climatique : réalité des dommages et substituabilité des dommages marchands et non-marchands

Le recours à une 'Préférence pour la stabilité du climat' comme mesure des bénéfices des politiques climatiques est motivé par l'incertitude sur les conséquences du changement climatique : compte tenu des impacts éventuellement très défavorables d'un réchauffement à l'échelle globale de +2°C en 2100 (impliquant des chocs climatiques de plus grande ampleur sur les continents), nous pouvons souhaiter, à titre de précaution, limiter la dérive du climat en diminuant nos émissions de GES avant même de disposer d'informations exhaustives sur la réalité des impacts. C'est donc une nouvelle fois une définition *en creux* des risques climatiques et des dommages : comme pour l'analyse coût-efficacité où l'on définit un espace de changement climatique socialement acceptable pour encadrer les risques climatiques (à partir d'un jugement coût-bénéfice implicite reposant sur des croyances à propos de l'étendue du changement climatique et de la manière dont nous en serons affectés), l'analyse coût-bénéfice avec 'Préférence pour la stabilité du climat' repose sur un indicateur de l'ampleur du changement climatique, perçu en tant que tel comme dangereux, et non sur un indicateur explicite des dommages associés à tel scénario de changement climatique.

Pour cette dernière section, on se propose de partir d'une représentation explicite des impacts et de leurs conséquences sur le bien-être, en les considérant d'une part, dans leur acception la plus courante - quand ils sont perçus comme des pertes du revenu - et d'autre part, dans une dimension importante vis à vis de la décision mais mal connue dans le cas qui nous intéresse - les pertes en bien-être associées à une dégradation de l'environnement pris comme source de satisfactions multiples.

IV.1. Deux biens menacés de manière différente par le changement climatique

En cherchant à représenter les différents mécanismes qui conduisent des impacts aux dommages (voir chapitre I §1), on est amené à considérer deux biens qui sont menacés de manière différente par le changement climatique :

- *le niveau de production agrégée*: sauf à supposer une chute dramatique de la productivité générale de l'économie en réponse à une dégradation du capital naturel accompagnée d'une accélération marquée de l'obsolescence du capital productif et des infrastructures – deux phénomènes qui mettent en péril les perspectives de développement, le niveau de production est dans l'ensemble *différé dans le temps*. En outre, le scénario de croissance est certes infléchi mais on peut espérer qu'un certain nombre de solutions techniques permettront de renouveler et d'adapter activités productives et implantations humaines au contexte d'un climat en évolution.
- *l'environnement comme source d'aménités*: à l'inverse, en raison de l'inertie des dynamiques naturelles (toute tonne émise dans l'atmosphère y séjourne longtemps et son empreinte sur le climat est durable), les aménités produites par l'environnement peuvent être menacées de manière *irréversible*, en particulier parce qu'il n'existe pas de substitut produit par la main de l'homme.

Si on considère que ces deux biens, qui participent au bien-être, sont substituables au moins dans une certaine mesure, cette différence fondamentale peut impliquer des changements assez importants du ratio des utilités marginales, dans le sens d'un revalorisation des aménités environnementales, dès lors que l'environnement est davantage dégradé et que l'on s'approche de seuils de résilience des écosystèmes. Cette tendance pourra être renforcée si les aménités environnementales ont les caractéristiques d'un bien supérieur.

L'enjeu est ici d'examiner comment sont modifiées les recommandations des modèles intégrés quand le changement climatique affecte non plus – comme c'est la pratique courante – ce seul bien, agrégé, qu'est le niveau de revenu, mais deux biens de nature différente, que sont d'une part, la production marchande et d'autre part, la qualité de l'environnement. En effet, si les études d'impacts et les tentatives d'évaluer les pertes et gains en bien-être qu'ils entraînent prennent bien en compte l'existence d'impacts de nature très différente, l'écriture des fonctions de dommages repose uniquement sur une donnée agrégée : un gain ou une perte de bien-être équivalents exprimés en pourcentage du revenu. Dès lors, les fonctions de dommages n'interviennent dans le modèle qu'au niveau du revenu (comme un gain ou une perte de production nette) et non pas de l'utilité (qui dépend seulement de la consommation). On fait donc l'hypothèse – fort discutable, nous venons de le voir – que le ratio des utilités marginales entre impacts marchands et non-marchands reste inchangé par rapport à l'unique point de calibrage, avec le risque de sous-estimer les dommages vraiment ressentis si les aménités environnementales sont fortement dégradées ou si elles sont traitées comme un bien supérieur par les générations futures qui seront plus riches.

IV.2. Un modèle intégré coût-bénéfice avec deux types d'impacts du changement climatique

Afin d'étudier les termes de l'arbitrage entre sacrifice de la consommation courante pour réduire les émissions et protection des aménités environnementales et de la consommation futures, nous allons comparer les trajectoires optimales d'émissions produites par un modèle intégré dont les spécifications des impacts sont calibrées à partir d'une même perte équivalente en bien-être mais correspondent à différentes répartitions des impacts touchant la consommation et les aménités environnementales.

Pour ce faire, nous repartons de la fonction d'utilité à deux biens présentée auparavant en changeant d'optique : les préférences vis à vis de l'environnement ne représentent plus cette fois une 'Préférence pour la stabilité du régime climatique' mais bel et bien les préférences vis à vis des aménités offertes par l'environnement. Ces aménités décroissent de manière linéaire avec l'amplitude du réchauffement global et la perte en bien-être correspondante, toujours négative, peut s'évaluer via le CAP. Là encore, la qualité de l'environnement est traitée comme un bien supérieur

En parallèle, on introduit une fonction d'impact, $\Phi(\cdot)$, qui relie amplitude du réchauffement global et impact sur la production (en % du revenu). Cette fonction représente la fonction de dommage couramment utilisée. On écrit :

$$\Phi(\Delta\theta) = \alpha (\Delta\theta)$$

avec : $\Delta\theta$ amplitude du réchauffement ($^{\circ}C$)
 α coefficient d'échelle (% du PIB)

Ainsi représentés, les impacts agrégés sur la production sont toujours négatifs. On peut noter qu'un même impact n'aura pas les mêmes conséquences sur le bien-être (c'est à dire ne conduira pas au même dommage) selon le niveau du revenu (utilité marginale décroissante de la consommation) et de la qualité de l'environnement. On fait l'hypothèse que la productivité globale de l'économie se dégrade sous l'effet du changement climatique au même rythme que les aménités environnementales : $\Phi(\cdot)$ est ainsi une fonction linéaire.

En reprenant les notations du modèle *RESPONSE_II*, le niveau de bien-être d'un individu à la date t pour un niveau de réchauffement donné s'écrit :

$$K \cdot \ln \left[C_t \left(1 - \alpha (\theta_{At}(t) - \theta_{At}(1990)) \right) \right] \cdot \left(\bar{\theta} - (\theta_{At}(t) - \theta_{At}(1990)) \right)^\beta$$

où C_t niveau de consommation à la date t
 K constante d'échelle (voir calibrage).

Pour calibrer le coefficient de la fonction de dommage (α) et l'élasticité-climat de la fonction d'utilité (β), on recherche les couples (α, β) tels qu'un réchauffement d'une ampleur de $+\theta$ $^{\circ}C$ s'accompagne d'une perte en bien-être équivalente à une diminution de δw % du revenu de référence. C'est ce qui est représenté Figure V-16. Notre hypothétique situation de référence est figurée au point A : le revenu de référence y vaut C^{ref} et la qualité de l'environnement, n'étant pas affectée par le changement climatique, est à son maximum, $\bar{\theta}$. Le niveau de bien-être en ce point vaut U . Du fait des impacts d'un changement climatique d'amplitude θ , les aménités environnementales (point C), le revenu (point B) voire les deux (point C') sont affectés à la baisse. Dans tous les cas, le niveau de bien-être vaut maintenant U' ($U' < U$) et les spécificités de la fonction d'utilité sont déterminées de telle sorte que cette baisse de l'utilité corresponde à une perte en bien-être équivalente à δw % du revenu de référence. Le paramètre K intervient pour s'assurer que quelles que soit la valeur de β , les niveaux d'utilité dans la situation de référence soit toujours le même, égal à U .

Qualité du climat (°C)

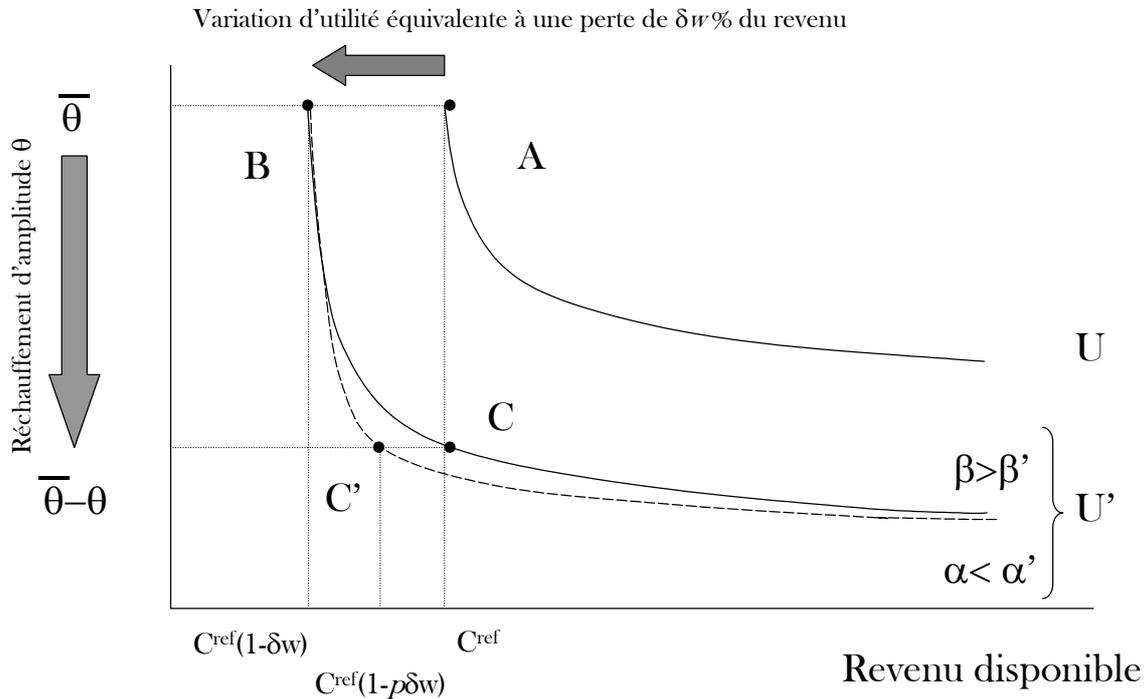


Figure V-16. Procédure de calibrage des paramètres de la fonction d'utilité et de la fonction de dommage.

On cherche en fait les couples (α, β) tels que :

- les impacts sur le revenu représentent une fraction p de δw , la perte en bien-être équivalente à un changement climatique d'amplitude θ , p décrivant $[0;1]$. Ainsi, p vaut 1 au point B et 0 au point C .
- la perte de bien-être résultant de ces impacts différemment répartis entre revenu et qualité du climat conduit à une baisse équivalente à $\delta w\%$ du revenu.
- le niveau de bien-être dans le scénario de référence se maintient à U .

C'est à dire :

$$\alpha(p), \beta(p) / \begin{cases} \alpha(p)\theta = p\delta w \\ K(p)\ln(C^{ref}(1-\delta w))(\bar{\theta})^{\beta(p)} = K(p)\ln(C^{ref}(1-p\delta w))(\bar{\theta}-\theta)^{\beta(p)} \\ K(p)\ln(C^{ref})\bar{\theta}^{\beta(p)} = K(p')\ln(C^{ref})\bar{\theta}^{\beta(p')} \quad \forall (p, p') \in [0;1] \end{cases}$$

Il vient :

$$\left\{ \begin{array}{l} \alpha(p) = \frac{p\delta w}{\theta} \\ \beta(p) = \frac{\ln[\ln(C^{ref}(1-\delta w))] - \ln[\ln(C^{ref}(1-p\delta w))]}{\ln(\bar{\theta} - \theta) - \ln(\bar{\theta})} \\ K(p) = (\bar{\theta})^{-\beta(p)} \quad (\text{avec } K(1) = 1) \end{array} \right.$$

Ainsi, le point *B* représente une situation où la qualité de l'environnement comme vecteur d'aménités n'est pas un déterminant du bien-être ($p=1$, $\alpha=\delta w/\theta$, $\beta=\beta(1)=0$), le point *C*, son exact symétrique ($p=0$, $\alpha=0$) et le point *C'*, une situation intermédiaire où le dommage équivalent est réparti entre consommation et qualité du climat, sachant que l'impact direct sur la consommation en représente une fraction p .

Pour le calibrage, nous avons retenu une référence arbitraire : une perte de bien-être équivalente à 2% du revenu disponible ($\delta w = 0,02$) pour un réchauffement de +2°C, ce qui se produit vers 2060 pour une sensibilité du climat fixée à +3,5°C. Nous obtenons les coefficients suivants :

p (coefficient de partage)	0	1/3	1/2	2/3	1
$\alpha(p)$ (% du PIB)	0	0,0066	0,01	0,0134	0,02
$\beta(p)$	0,0029176	0,0019522	0,0014669	0,0009797	0
$K(p)$	0,9959636	0,9972973	0,9979685	0,9986427	1

RESPONSE_II a été reformulé comme suit (voir Encadré V-4), en tenant compte des nouvelles spécifications de la fonction d'utilité et de la fonction de dommage : l'objectif du planificateur central est de maximiser l'utilité inter-temporelle des générations successives, dont le bien-être dépend d'une part de la consommation privée *per capita* nette des coûts d'abattement, $f(\cdot)$, et des impacts du changement climatique, $\Phi(\cdot)$, et d'autre part, de la qualité du climat, mesurée selon l'augmentation de la température moyenne globale de l'atmosphère.

Pour cette section, η , la préférence pure pour le présent est fixée à 3 %.^{an} ; $\bar{\theta}$, le seuil absolu de réchauffement au-delà duquel le changement climatique est perçu comme indubitablement dangereux, à +4°C et la sensibilité du climat est fixée à sa valeur centrale : +3,5°C. Les simulations sont menées pour cinq valeurs du coefficient de partage des dommages, p : {0 ; 1/3 ; 1/2 ; 2/3 ; 1}.

Encadré V-4. Politique climatique optimale et catégories d'impacts du changement climatique : évaluation à l'aide du modèle coût-bénéfice RESPONSE_II.

Le code du modèle est disponible en annexe.

Fonction objectif

Maximisation de l'utilité inter-temporelle des générations successives

$$\text{Max}_{Ab_t} \sum_{t=1990}^{2300} N_t K(p) \left\{ \ln \left(c \frac{Y_t - f(Ab_t, Ab_{t-1}, t) - Y_t \Phi(p) (\theta_t(t) - \theta_t(1990))}{N_t} \right) \dots \right. \\ \left. (\bar{\theta} - (\theta_t(t) - \theta_t(1990)))^{\beta(p)} \right\} e^{-\eta(t-1990)}$$

Emissions de référence de CO₂ (em_t)

données exogènes, tirées du scénario de référence (A1-m).

Cycle du carbone

$$\begin{pmatrix} A_{t+1} \\ B_{t+1} \\ O_{t+1} \end{pmatrix} = C_{trans} \cdot \begin{pmatrix} A_t \\ B_t \\ O_t \end{pmatrix} + \delta \cdot (1 - Ab_t) \cdot em_t \cdot \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}$$

Evolution de la température moyenne globale

$$\begin{Bmatrix} \theta_{At}(t+1) \\ \theta_{Oc}(t+1) \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 - \sigma_1(\lambda + \sigma_2) & \sigma_1 \sigma_2 \\ \sigma_3 & 1 - \sigma_3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \theta_{At}(t) \\ \theta_{Oc}(t) \end{bmatrix} + \sigma_1 \begin{bmatrix} F_{2x} \log(A_t / A_{pl}) / \log 2 \\ 0 \end{bmatrix}$$

Les résultats sont présentés Figure V-17. On peut d'emblée constater que les diverses spécifications retenues pour représenter les chemins qui conduisent des impacts aux dommages induisent des différences beaucoup plus faibles entre les trajectoires optimales d'émissions que par exemple l'incertitude sur la sensibilité du climat ou les préférences des populations (voir *supra*). On doit se rappeler que le calibrage a été mené pour une même perte équivalente de revenu, relativement faible.

Le partage entre dommages marchands et non-marchands n'a pas beaucoup d'influence sur la politique climatique à court-terme : jusqu'en 2020, les trajectoires d'émission sont presque confondues dans chaque cas. Pour le moyen- long-terme en revanche, les écarts commencent à apparaître. Surtout, on doit remarquer que les niveaux d'efforts sont qualitativement différents selon le coefficient de partage dommages marchands/non-marchands: plus les dommages non-marchands représentent une part importante du dommage total, plus le niveau d'effort est élevé. La trajectoire optimale d'émissions quand les impacts ne frappent que la consommation ($p=1$) est systématiquement supérieure à celle correspondant à la situation inverse ($p=0$), où les impacts du changement climatique frappent uniquement les aménités environnementales : en

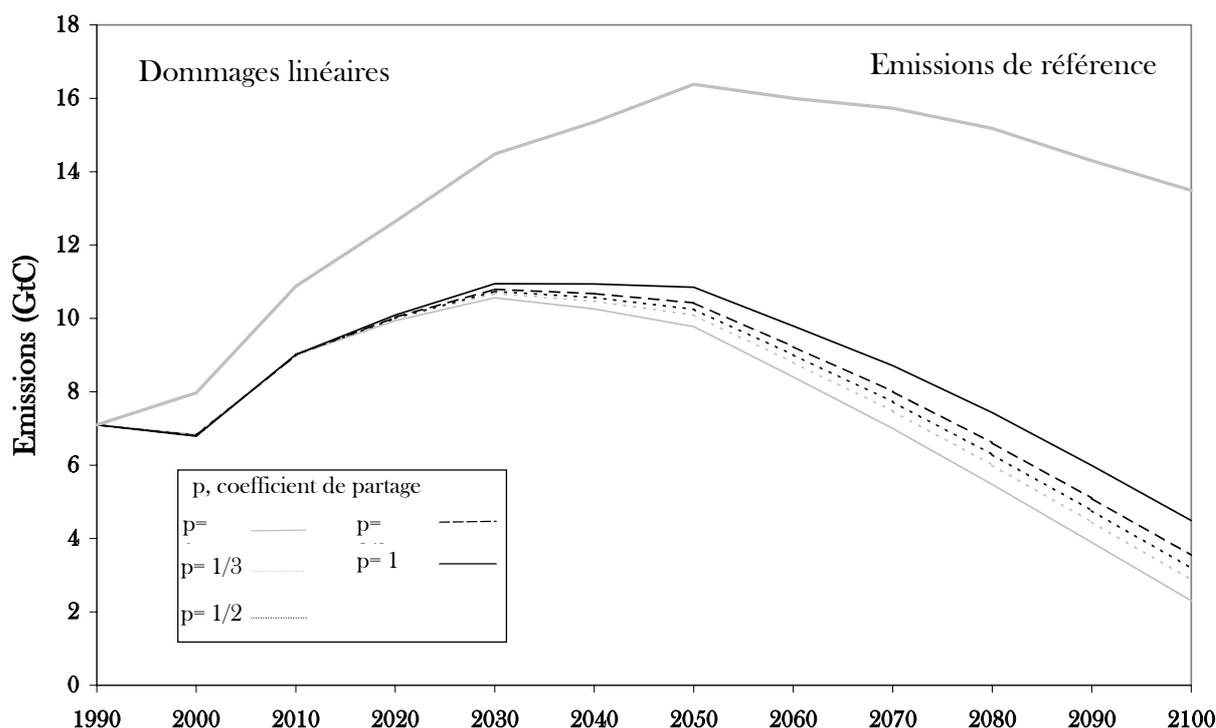


Figure V-17. Politique climatique optimale pour différents partages des impacts du changement climatique, entre consommation et aménités du climat.

2050, les niveaux d'abattement sont de 45% dans le premier cas et 40% dans le second ; l'écart passe respectivement à 68% et 64% en 2080.

De tels résultats, qui ne prétendent pas être conclusifs sur les trajectoires d'émissions à suivre pour les prochaines décennies, soulignent toute l'importance d'adopter une représentation exhaustive des différents mécanismes qui conduisent des impacts aux dommages pour capturer les différentes manières dont le changement climatique pourrait effectivement affecter notre bien-être et comment elles influencent la décision. On doit d'ailleurs noter que notre approche est encore incomplète puisque ne sont pas représentés les impacts du changement climatique sur la dynamique d'accumulation du capital (voir Chapitre I §1). C'est une des directions d'un développement futur d'une famille de modèles intégrés comme *RESPONSE* que de comporter un modèle de croissance complet.

Conclusion

En passant d'un cadre coût-efficacité à un cadre coût-bénéfice, on retient non plus une mesure binaire des bénéfices environnementaux des politiques climatiques mais une mesure qui permet de les valoriser. Ce faisant, on autorise un arbitrage entre niveau effectif de protection de l'atmosphère et du climat et coût d'une telle action, ce qui, par nature, ne peut se produire dans une analyse coût-efficacité. Cette dernière implique donc bien souvent des

recommandations très contraignantes (au moins à court-terme) car les contraintes environnementales doivent y être satisfaites, quel qu'en soit le coût. Ce sont les termes de cet arbitrage que nous avons examiné ici en comparant les trajectoires optimales d'émissions obtenues d'un côté, pour une approche coût-efficacité avec une contrainte donnée sur l'amplitude du réchauffement - autrement dit, un objectif jugé socialement désirable - et de l'autre, pour une approche coût-bénéfice avec une 'Préférence pour la stabilité du climat' correspondant à ce même objectif.

En univers certain, nos résultats montrent que la distribution des efforts entre générations se traduit par des sacrifices de consommation très différenciés en mode coût-efficacité et beaucoup moins en mode coût-bénéfice, où la répartition est davantage égalitaire. En particulier, même si on y assiste à un dépassement temporaire de l'objectif socialement désirable pour écrêter le pic d'efforts supportés par les générations de la seconde moitié du XXI^{ème} siècle, les efforts à court-terme sont plus moins importants qu'en mode coût efficacité (éventuellement, jusqu'à près du double). En définitive, si on observe bien un arbitrage qui conduit à un relâchement des efforts à moyen- long-terme, les efforts de court-terme en sont renforcés.

En présence d'incertitude, on n'observe pas pour les analyses coût-bénéfice d'attraction par le pire des cas certains de la trajectoire optimale d'émissions comme c'est le cas pour une approche coût-efficacité. Les regrets économiques sont dès lors beaucoup moins importants et l'effet de l'apprentissage est plus faible qu'en mode coût-efficacité. En outre, toute sur-protection de l'atmosphère et du climat s'accompagne d'un gain à la marge en bien-être impliquant. Tout regret économique s'accompagne donc d'un gain environnemental, le regret net est donc plus faible. Les valeurs de l'information attachées à la sensibilité du climat et aux préférences des populations sont donc moindres. On peut par ailleurs constater que l'incertitude sur les préférences (les croyances sur les risques et l'objectif désirable) est beaucoup plus importante que l'incertitude sur la dynamique du climat.

Si l'introduction d'une 'Préférence pour la stabilité du climat' autorise une relative souplesse pour les politiques climatiques de précaution, elle reste suffisamment forte pour impliquer de maintenir les efforts d'abattement comme on peut s'en rendre compte quand on représente explicitement d'une part, les impacts du changement climatique sur la production marchande et d'autre part, les impacts sur les aménités environnementales.

La 'Préférence pour la stabilité du climat' est une mesure holiste de la réalité des risques climatiques, en ce sens qu'elle résulte d'un jugement holistique sur ces derniers. Cependant, au-delà, on peut souhaiter se livrer à une investigation des impacts et des dommages, avec les difficultés que l'on sait. C'est ce que nous allons faire au dernier chapitre de cette thèse. Compte tenu des très grandes incertitudes en ce domaine, nous n'allons pas aborder cette question dans une perspective normative mais rechercher à quelles croyances sur les risques correspondent différentes attitudes et à introduire des éléments de rationalité dans ce qui serait sinon un débat sans fin, entre les demandes de certains groupes environnementalistes et les résistances d'une partie de l'opinion devant des mesures jugées impopulaires.

Références bibliographiques

- Aghion, P. et P. Howitt (2000). *Théorie de la croissance endogène*, Dunod, Paris.
- Houghton, J.T., Y. Ding, D.J. Griggs, P.J. Noguer, P.J. van der Linden, X. Dai, K. Maskell et C.A. Johnson (dir.) (2001). *Climate change 2001: the scientific basis. Contribution of Working Group I to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, Cambridge University Press, Cambridge (UK&US).
- Kristrom, B. et P. Riera (1996). Is the income elasticity of environmental improvements less than one?, *Environmental and Resource Economics*, 7, 45-55.
- Lave, L.B. et H. Dowlatabadi (1993). Climate Change: The Effects of Personal Beliefs and Scientific Uncertainty, *Environ. Sci. Technol.*, 27 (10), 1962-1972.
- Lecocq, F. (2000). *Distribution spatiale et temporelle des coûts des politiques publiques sous incertitudes: théorie et pratique dans le cas de l'effet de serre*, Thèse de Doctorat, Sciences de l'environnement, Ecole Nationale du Génie Rural, des Eaux et Forêts (ENGREF), Paris.
- Manne, A.S., R. Mendelsohn et R. Richels (1995). MERGE - A Model for Evaluating Regional and Global Effects of GHG Reduction Policies, *Energy Policy*, 23 (1), 17-34.
- Nordhaus, W. et J.G. Boyer (2000). *Warming the world: Economics models of Climate Change*, 246 p, MIT Press, Cambridge (MA, USA).
- Pearce, D. (1980). The social incidence of environmental costs and benefits, in *Progress in Resource Management and Environmental Planning*, T. O'Riordan et K.R. Turner (dir.), p 63-88, John Wiley & Sons.
- Tol, R.S.J. (1999). *New estimates of the damage costs of climate change. Part I: Benchmark estimates*, (report n° D99/01), 29 p. Instituut voor Milieuvraagstukken (IVM), Vrije Universiteit Amsterdam, Amsterdam (the Netherlands).

Chapitre VI

Vers une analyse coût-bénéfice généralisée :
Leçons du modèle **RESPONSE_Δ**

**CHAPITRE VI VERS UNE ANALYSE COUT-BENEFICE GENERALISEE : LEÇONS
DU MODELE RESPONSE_Δ295**

I. A la recherche de la fonction de dommages	300
I.1. Une information rare et très fragile pour écrire les fonctions de dommages	300
I.2. L'extrapolation d'une fonction de dommages : un exercice où règnent l'incertain et l'arbitraire de la modélisation	302
I.3. Quels arguments entrent dans la fonction de dommages ? Hypothèses et limites.	303
I.3.1. L'amplitude du réchauffement (moyen global)	304
I.3.2. Le niveau de revenu.....	305
I.4. Quelles formes fonctionnelles sont couramment retenues ? Hypothèses et limites.	305
I.4.1. Réchauffement bénéfique, réchauffement défavorable : quelle forme fonctionnelle retenir ?	307
I.4.2. Croissance régulière de la vulnérabilité au changement climatique ou existences de seuils : limite des formes régulières couramment utilisées	309
II. Hypothèses sur les fonctions de dommages et trajectoires optimales d'émissions.....	312
II.1. Une incertitude-clé : la forme de la fonction de dommages	312
II.2. Courbure de la fonction de dommages et politiques climatiques optimales : une exploration numérique	313
II.3. Jeu croisé de l'actualisation et profil temporel des dommages : un modèle analytique	317
III. Rôle de l'incertitude sur la dynamique du climat et des croyances sur les dommages dans l'analyse coût-bénéfice	324
III.1. Fonctions de dommages à seuils vs fonctions de dommages quadratiques en présence d'incertitude sur la sensibilité du climat	325
III.2. Politiques de précaution et croyance sur les risques climatiques.....	335
Conclusion	339
Références bibliographiques.....	341

Table des figures

Figure VI-1. Formes fonctionnelles les plus fréquentes dans la littérature.	306
Figure VI-2. Fonctions de dommages régionalisées du modèle <i>RICE</i>	308
Figure VI-3. Fonctions de dommages utilisées pour l'analyse de sensibilité avec le modèle <i>DICE-94</i>	314
Figure VI-4. Chronogramme du bénéfice marginal pour trois formes de la fonction de dommages.	316
Figure VI-5. Taux d'abattement des émissions de référence pour le modèle DICE et pour une version modifiée : émissions de référence A1 (EmA1), réponse du climat (temp) puis les deux (temp+EmA1).....	323
Figure VI-6. Profils des dommages au XXI ^{ème} siècle pour le scénario A1-m.	326
Figure VI-7. Politique climatique optimale en présence d'incertitude sur la sensibilité du climat (dommages quadratiques, pas d'apprentissage).	329
Figure VI-8. Politique climatique optimale en présence d'incertitude sur la sensibilité du climat (dommages quadratiques, avec arrivée d'information).	329
Figure VI-9. Politique climatique optimale en présence d'incertitude sur la sensibilité du climat (dommages à seuil, pas d'apprentissage).....	330
Figure VI-10. Incertitude sur la sensibilité du climat et rencontre des seuils de danger dans les dommages.....	331
Figure VI-11. Politique climatique optimale en présence d'incertitude sur la sensibilité du climat (dommages à seuil, avec arrivée d'information).	333
Figure VI-12. Valeur de l'information sur la sensibilité du climat en fonction de sa date d'arrivée pour des dommages quadratiques et à seuil.....	333
Figure VI-13. Politique climatique optimale pour des dommages quadratiques ou à seuil en présence d'incertitude sur la sensibilité du climat.	334

Figure VI-14. Profils des dommages du modèle *RESPONSE_Δ* (sensibilité du climat = +3,5°C).....336
 Figure VI-15. Politique climatique optimale en présence d'incertitude sur la forme de la fonction de dommages :
 quadratique ou à seuil.338

Table des tableaux

Tableau VI-1. Réponse optimale du modèle *DICE-94* (% des émissions de référence) pour trois formes de
 fonction de dommages.314
 Tableau VI-2. Variation (% de la valeur initiale) du montant des dépenses d'abattement à la première période
 quand le taux d'actualisation croît de 1 point (+1 *%an⁻¹*), pour différentes valeurs de l'exposant de la fonction de
 dommages.321

Table des encadrés

Encadré VI-1. Un changement climatique abrupt ? Du climat aux répercussions socio-économiques des impacts,
 cinq niveaux d'amplification des dommages.309
 Encadré VI-2. Politiques climatiques de précaution en présence d'incertitude sur la sensibilité du climat :
 évaluation à l'aide du modèle coût-bénéfice *RESPONSE_Δ*.327
 Encadré VI-3. Politiques climatiques de précaution en présence d'incertitude sur la forme des fonctions de
 dommages : évaluation à l'aide du modèle coût-bénéfice *RESPONSE_Δ*.....337

Avec ce chapitre, nous arrivons maintenant à la troisième et dernière mesure des bénéfices des politiques climatiques que nous nous sommes proposés d'employer pour discuter les trajectoires optimales d'émissions de GES, à savoir une représentation explicite des dommages du changement climatique. Nous avons vu au chapitre I qu'il s'agit de la mesure la plus pertinente pour examiner les politiques climatiques (puisqu'elle permet de décrire l'arbitrage entre niveau d'effort consenti et niveau de protection du climat, des écosystèmes, des activités productives, en termes de conséquences sur le bien-être des populations) mais en même temps, de la mesure la plus fragile (puisqu'elle est tributaire d'une longue cascade d'incertitudes).

C'est la tension entre ces deux caractéristiques qui va nous guider au long de ce dernier chapitre avec les deux objectifs suivants :

- poursuivre la comparaison des recommandations pour l'action entre les différents cadres d'analyse de la décision que nous avons entrepris d'explorer : les politiques climatiques de précaution sont-elles particulièrement contraignantes ?; quelles sont les incertitudes les plus cruciales pour la décision ?; le phénomène d'apprentissage joue-t-il un rôle déterminant et y'a-t-il une fenêtre d'opportunité associée à l'information sur un paramètre donné ?
- poursuivre l'examen de la représentation des risques climatiques dans les modèles intégrés d'évaluation ou de recherche des politiques climatiques optimales, comme un préalable pour juger de la fiabilité des recommandations qu'ils produisent : les éléments déterminants vis à vis de la décision y sont-ils effectivement convenablement incorporés ?; quelle confiance peut-on placer dans les estimations des dommages et dans la construction des fonctions de dommages ?

Ce qui nous renvoie au constat initial de cette thèse, à l'origine de notre démarche : notre connaissance des impacts du changement climatique et des nombreux chemins par lesquels ils affectent finalement le bien-être est encore trop fragile ; leur reflet dans les modèles est encore bien fruste donc pour ne pas inviter à accueillir leurs résultats avec une certaine prudence. En particulier, au-delà des incertitudes liées à l'estimation même des dommages, l'absence d'information pour d'autres visages du changement climatique qu'un doublement de la concentration de CO₂ vers 2060 pose un problème crucial au moment de décrire impacts et dommages dans les modèles : comment sont caractérisés les risques à long-terme, les risques d'un changement plus rapide, l'éventualité du déclenchement de crises graves dans les régions en développement ?

Notre analyse va ainsi porter sur la fonction de dommages, c'est à dire l'outil mathématique qui joue le rôle d'interface entre systèmes naturels et systèmes socio-économiques dans les modèles intégrés. Nous ne prétendons pas ici proposer des fonctions de dommages plus réalistes que celles qui sont couramment utilisées aujourd'hui mais nous étudions les limites et les implications pour la décision de tels choix de modélisation pour révéler les croyances sur les risques climatiques qui sont cohérentes avec une attitude donnée (agir ou attendre) quand on recourt à l'analyse coût-bénéfice: a-t-on une représentation valide des éventuels chocs supportés par les populations les plus vulnérables ?; quelles hypothèses sont implicitement formulées sur le dommage marginal et les risques à long-terme quand on choisit telle ou telle forme ?; dans quelle mesure, les hypothèses sur le niveau de dommages et la forme du dommage marginal jouent-elles le rôle d'une main invisible sur les recommandations des modèles intégrés ?; quelle incertitude - entre l'échelle de la fonction, sa courbure et la dynamique du climat - est la plus importante pour la décision ?

I. A la recherche de la fonction de dommages

La fonction de dommages est l'outil employé dans les modèles intégrés pour représenter les différents mécanismes conduisant éventuellement, à la suite d'une modification du climat, à une perte en bien-être : ce sont les fonctions Φ , Ψ et Ξ du modèle heuristique présenté au chapitre I. Elle assure donc l'interface entre systèmes environnementaux et systèmes économiques et sociaux en établissant un lien entre amplitude du changement climatique en cours (le plus souvent mesurée suivant l'évolution de la température moyenne globale) et impacts résultants (exprimés en unité monétaire, souvent en pourcentage du revenu). Au moment de passer à une analyse coût-bénéfice des politiques climatiques, il est légitime de s'interroger sur la qualité des informations à notre disposition pour écrire de telles fonctions et examiner dans quelle mesure les risques climatiques sont représentés de manière fiable dans les modèles intégrés.

I.1. Une information rare et très fragile pour écrire les fonctions de dommages

On a donné au chapitre I de cette thèse de nombreux aperçus des résultats des études d'impacts du changement climatique. Nous avons vu qu'il s'agit d'une masse toujours croissante d'informations sur nos vulnérabilités potentielles mais elles avancent en ordre trop dispersé pour donner un tableau global et cohérent des impacts du changement climatique : ce sont des études souvent sectorielles ou régionales, à des dates différentes, pour des scénarios de changement climatique et socio-économique différents. Elles sont donc difficilement comparables et ce d'autant plus que les impacts sont évalués selon des indicateurs très divers d'une étude à l'autre : par exemple, on peut avoir trois niveaux de lecture pour les impacts sur l'agriculture (impacts physiques sur la production mesurés avec les variations des rendements, impacts économiques à l'échelle du secteur mesurés selon la variation de la part du secteur agricole dans l'activité régionale, impacts sur la sécurité alimentaire mesurés avec un indicateur des risques de sous-alimentation et de famine).

Pour nourrir leurs modèles d'évaluation des politiques climatiques, trois auteurs [*Mendelsohn et al.*, 1997, 2000; *Nordhaus et Boyer*, 2000; *Tol*, 1999a, b] ont cependant pris le risque - nous l'avons vu au chapitre I - de rassembler certains de ces résultats et de les homogénéiser en les convertissant en unité monétaire pour disposer d'une estimation économique des impacts du changement climatique par grandes régions du monde et par secteurs d'activité : ce sont les chiffres exposés au tableau I-3 du chapitre I, qui servent de manière récurrente à l'écriture des fonctions de dommages et alimentent, pour une grande part, le discours sur les conséquences socio-économiques des impacts du changement climatique.

Compte tenu de la pauvreté des informations alors disponibles (entre 1995 et 1999)¹ et compte tenu de l'extrême hétérogénéité de ces informations, ces tentatives de cerner les risques climatiques se sont faites au prix d'hypothèses plutôt héroïques. Citons par exemple :

- l'évaluation des impacts du changement climatique dans une catégorie donnée en les extrapolant à l'échelle de la région à partir d'une ou deux études de cas locales (une ou

¹ A cette période, les impacts sur certains secteurs, comme les infrastructures, le tourisme, sont encore très peu étudiés ; de même, pour certaines régions, comme l'Afrique par exemple.

deux stations pour évaluer la vulnérabilité du secteur agricole) ou en transférant les résultats d'une région à l'autre (pour évaluer la vulnérabilité des zones côtières à la hausse du niveau des mers où les chiffres sont étendus depuis des études américaines) ;

- de même, des hypothèses difficilement contrôlables et des biais méthodologiques importants au moment d'évaluer les coûts socio-économiques de ces myriades d'impacts pour les comparer au PIB (comme l'absence de modèle économique pour encadrer les répercussions socio-économiques des impacts, en se contentant de suivre une approche énumérative).

Nous n'allons pas revenir ici en détail sur les nombreuses limites qui accompagnent ces chiffres (voir chapitre I, § II) et nous nous contenterons de rappeler qu'il s'agit d'estimations monétaires très incertaines des impacts parce que *l'exposition au risque climatique* (comment le climat est localement modifié et ce que l'on peut dire sur les températures, les régimes des précipitations, etc.) est incertaine, parce que *la sensibilité* en face de cette modification du climat (le modèle d'impact, l'existence de seuils, le scénario de population, etc.) est incertaine et parce qu'enfin *les capacités d'adaptation* (options techniques, mise en œuvre effective, influence du scénario de développement socio-économique, etc.) sont incertaines. Sans parler des difficultés associées à la traduction monétaire de ces impacts.

A la très grande fragilité des données de base pour écrire les fonctions de dommages, s'ajoute une seconde difficulté : comment extrapoler de telles fonctions à partir d'un unique point de calibrage ? En effet, la fonction de dommages doit rendre compte de la manière dont évolue notre vulnérabilité au changement climatique pour différents niveaux de stress climatique (en particulier pour un réchauffement plus important que les +2,5°C couramment envisagés), pour différents rythmes d'évolution du climat, pour une large gamme de scénarios socio-économiques (dont dépendent notre sensibilité au changement climatique et nos capacités d'adaptation), pour différents horizons temporels (2020, 2050, 2100, au-delà). Autrement dit, elle doit idéalement décrire, pour n'importe quelle trajectoire climatique et n'importe quel scénario de développement socio-économique, comment se répartissent pour toutes les catégories d'intérêt et toutes les régions du monde les impacts du changement climatique, quelle est notre sensibilité à cet environnement changeant, quelles sont nos possibilités d'adaptation et quelle est notre vulnérabilité résiduelle. Pour écrire sans perte de généralité de telles fonctions, c'est donc d'un très grand nombre de points explorant les multiples combinaisons précédentes qu'il faudrait disposer. Malheureusement, on l'a vu, de telles estimations discrètes sont rares (chacune des études présentées au chapitre I ne donne qu'un seul point et elles ne sont pas comparables entre elles) et se concentrent exclusivement sur les impacts d'une augmentation de la température moyenne globale au maximum de +2,5°C vers 2060 (c'est à dire pour un changement climatique relativement modéré, à moyen terme).

On est donc contraint de formuler un certain nombre d'hypothèses supplémentaires pour construire ces inaccessibles fonctions de dommages, ce qui rajoute, en sus des incertitudes imputables aux données de base pour les calibrer, une couche supplémentaire d'incertitude. En définitive, comme dans tout choix de modélisation, on se trouve pris entre deux feux :

- d'un côté, l'exhaustivité de la représentation qui fait rechercher une modélisation abondante et certainement complexe d'un point de vue numérique,
- de l'autre, la parcimonie de cette représentation, pour limiter les sources d'incertitude et la part de l'arbitraire dans les hypothèses supplémentaires, et maintenir le problème à

un niveau de complexité raisonnable afin de conserver un caractère contrôlable aux résultats.

I.2. L'extrapolation d'une fonction de dommages : un exercice où règnent l'incertain et l'arbitraire de la modélisation

Passons maintenant en revue les principaux facteurs permettant de caractériser la réponse d'une économie et d'une société à un scénario de changement climatique, pour cerner les difficultés liées à l'extrapolation des fonctions de dommages. Dans un second temps, nous pourrions examiner dans quelle mesure les choix de modélisation couramment effectués sur ce point tâchent d'y apporter une réponse, si celle-ci est satisfaisante, et finalement en retour, quelles hypothèses sur les risques climatiques sont formulées dans ces exercices.

Dans un premier temps, identifions donc les éléments qui sont nécessaires à la construction d'une fonction d'impact ou d'une fonction de dommages. L'ambition est bien sûr de décrire comment évolue, au long d'une trajectoire de développement socio-économique, la vulnérabilité d'une région, d'un secteur d'activité, d'un écosystème à un scénario de changement climatique. Pour la représenter, il faudrait donc posséder des informations sur :

L'évolution du climat

Quelles informations on a sur la modification du régime climatique (avec la question des risques climatiques à long-terme) - amplitude du réchauffement bien sûr, mais également précipitations, régime des vents et modification de la variabilité du climat - et la vitesse à laquelle s'opèrent ces transformations. Ce dernier point - on s'en rappelle - est lié à la course de vitesse entre changement climatique et capacité de réaction et d'adaptation à l'évolution du climat et de l'environnement.

La sensibilité de l'entité en question

D'une part dans ses liens avec le changement climatique : comment elle évolue pour différents degrés de réchauffement climatique et en particulier, si on peut identifier des seuils de danger vis à vis du climat ou des transformations de l'environnement induites par une évolution du climat et quelle est notre sensibilité au changement climatique à long-terme (risque de sécheresses chroniques, irréversibilité de la hausse du niveau des mers, etc.)?

D'autre part dans ses liens avec les tendances de développement socio-économique : ainsi, elle peut être accrue (la population, par exemple, s'installe dans les zones côtières ou dans les plaines alluviales ; la pression sur les ressources en eau est déjà très importante et le risque d'une baisse des apports ou d'une variabilité accrue du fait du changement climatique aggrave notablement la situation) ou diminuée (les activités agricoles représentent une part moins importante dans le PIB et ont atteint un relatif degré d'artificialisation ; les infrastructures sont plus développées et permettent de mieux lutter contre les catastrophes naturelles ; on a pu mettre en place des programmes de santé publique pour éradiquer la malaria). Ce point est à mettre en rapport avec la question des *socially contingent damages* [Eyre et al., 1999]- c'est à dire des dommages contextuels ou comment les choix de développement conditionnent notre sensibilité au changement climatique.

Le niveau de développement socio-économique

Avec deux questions : a) comment évolue notre vulnérabilité dans le temps, au long d'un sentier de croissance, et comment se différencient les vulnérabilités des pays développés et en développement : assiste-t-on à une baisse tendancielle de nos vulnérabilités du fait d'un changement structurel des économies (réduction du secteur primaire) et de l'amélioration générale des conditions de vie ?; et b) les liens, antagonisme ou convergence, qu'il entretient avec les stratégies d'adaptation : quelles options seront réellement disponibles et quelle sera leur efficacité avérée ? existe-t-il des barrières financières, scientifiques, techniques ou institutionnelles à la mise en œuvre d'une stratégie d'adaptation donnée?

Les déterminants de la mise en œuvre effective des stratégies d'adaptation

Avec un certain nombre de questions déjà évoquées précédemment portant sur a) leur potentiel réel à réduire la vulnérabilité et les coûts de ces actions², les liens avec le scénario de développement (synergies ou antagonismes) et la question des inerties socio-économiques en lien avec la course de vitesse entre évolution du climat et capacité à mobiliser à temps les potentiels d'adaptation. Le succès des stratégies d'adaptation dépend en effet d'une part, de la capacité à détecter ou prévoir une modification du climat et à planifier des mesures appropriées et d'autre part, de la rapidité de la mise en œuvre de telles mesures, d'autant plus ralentie que le degré d'inertie socio-économique est élevé.

On peut le voir avec ces quatre déterminants, qui entretiennent des liens étroits entre eux, l'enjeu principal est de pouvoir adopter une vision dynamique des vulnérabilités au changement climatique : avec d'un côté, la question des risques de long-terme (serons-nous finalement adaptés au 'nouveau' régime climatique à l'équilibre avec des impacts résiduels somme toute supportables, ou bien, au contraire, nous dirigeons-nous vers des risques majeurs, avec des pertes irréversibles et des marges d'adaptation restreintes ?) et de l'autre, la question des risques associés à la transition en soulignant l'importance des chocs du fait de l'impossibilité de l'adaptation ou d'une mal-adaptation.

I.3. Quels arguments entrent dans la fonction de dommages ? Hypothèses et limites.

Avec des données issues d'une approche statique et à court-terme (voir sur ce point les critiques au chapitre I), nous sommes donc particulièrement démunis pour caractériser plus avant les fonctions de dommages. Dès lors, à quelles hypothèses simplificatrices ont recours les modélisateurs *faute de mieux*? Rappelons-nous que nous disposons seulement des informations suivantes (par région ou par secteur) : l'amplitude du réchauffement (et c'est la seule variable climatique dont nous disposons, en plus à l'échelle globale et pas à sa valeur régionale), le niveau d'impact (perte ou gain en pourcentage de PIB régional), le niveau du PIB et la date (2050-2060). Dans les fonctions de dommages couramment employées, deux arguments interviennent : l'amplitude du réchauffement (moyen global) et le niveau de revenu.

² Bien souvent en effet, dans les évaluations disponibles des impacts et des dommages, on suppose qu'un certain nombre de décisions d'adaptation ont été prises mais on ne connaît ni leurs déterminants (décision *ad hoc*, comportement rationnel avec anticipation, *etc.*), ni leur coût, ni leur efficacité technique (de combien ont été réduits l'impact et le dommage nets).

Nous allons voir que la manière dont ils interviennent dans la fonction de dommages n'est pas sans soulever un certain nombre de problèmes.

I.3.1. L'amplitude du réchauffement (moyen global)

Et c'est la seule information sur le changement climatique prise en compte. C'est bien sûr l'indice le plus simple pour représenter le changement climatique en cours (voir l'introduction du chapitre IV) et nous ne reviendrons pas sur le fait qu'il ne s'agit pas d'informations à une échelle régionale, ou d'informations climatiques plus riches (les précipitations, *etc.*).

En faisant référence seulement à l'amplitude du changement climatique, on formule en fait l'hypothèse que l'état initial (à partir duquel on mesure cette variation) est un état optimal des organisations économiques et sociales vis à vis du climat, que tout écart (significatif³) se traduit donc par une perte et que cette perte est ressentie en permanence même si le climat atteignait à long-terme un nouvel état d'équilibre. Notre présentation des risques climatiques s'étant essentiellement concentrée sur les risques d'une transition trop rapide ou non anticipée, ce choix de modélisation est en partie valide avec cependant les trois remarques suivantes :

- il n'y a pas à proprement parler de régime climatique optimal (sauf bien sûr si le changement climatique nous entraînait vers des situations extrêmement défavorables) mais tout écart du régime que nous connaissons actuellement, s'il est trop rapide ou non anticipé, est, lui, pénalisant.
- cette démarche ne prend pas en compte le rythme du changement climatique - pourtant un déterminant essentiel de nos vulnérabilités pendant les phases de transition. On doit signaler qu'à l'occasion du premier effort de modélisation intégrée du changement climatique (entre 1990 et 1995), certains modélisateurs ont cherché à prendre en compte dans les fonctions de dommages l'effet du rythme du changement climatique. Parmi la vingtaine de modèles intégrés qui ont vu le jour à cette période ([Bruce *et al.*, 1996], chap. X), c'est par exemple le cas du modèle *CETA* (*Carbon Emission Trajectory Assessment*) [Peck et Teisberg, 1994] et du modèle *ICAM* (*Integrated Climate Assessment Model*) [Dowlatabadi et Morgan, 1993]. Compte tenu de l'absence de données pour calibrer de telles fonctions, il faut voir ces tentatives comme des exercices à vocation méthodologique : comment écrirait-on une fonction de dommage si on avait des informations incluant le rythme du changement climatique⁴ ? Elles n'ont d'ailleurs pas connu de postérité (comme beaucoup des modèles intégrés qui avaient vu le jour au début des années 1990), précisément parce que les données de base manquent toujours.
- la question de la vulnérabilité à long-terme et l'existence de coût-permanents associés. Pour illustrer ces coûts permanents de long-terme, R. Tol [Tol, 1996] avance l'exemple des coûts des infrastructures d'adaptation à entretenir et à renouveler toujours (les

³ *significatif*, pour mettre momentanément de côté la question d'éventuels bénéfices du changement climatique pour une amplitude faible du réchauffement, question sur laquelle nous reviendrons à la section suivante quand nous serons amenés à discuter de la forme des fonctions de dommages.

⁴ C'est clairement explicité par H. Dowlatabadi dans un des premiers articles présentant son modèle *ICAM*: "At this stage, attention should be focused on the approach and methods we are illustrating and not on specific details of model outputs or conclusion" ([Dowlatabadi et Morgan, 1993], p. 213).

défenses côtières face à la hausse du niveau des mers) et des dommages irréversibles (submersion des territoires insulaires). Mais on est en droit de se demander ce que signifie vraiment ces coûts permanents de long-terme dans l'hypothèse où le système climatique se stabilise à un nouvel état : l'attachement des *climate change refugees* à leur terre ? il est oublié en quelques générations ; un coût d'adaptation de long-terme ? à proprement parler, il n'y a pas de coût d'adaptation à long-terme : les coûts d'adaptation sont les coûts associés à la transition d'un système économique et d'un mode de développement à un autre et ils disparaissent quand cette nouvelle conformation est atteinte.

I.3.2. Le niveau de revenu

Les impacts d'un niveau de réchauffement donné étant souvent exprimés en pourcentage du revenu, on assiste à une croissance homothétique du montant monétaire des impacts selon le revenu pour un niveau de réchauffement donné, en particulier dans le contexte d'une stabilisation du climat à un 'nouveau' régime. Autrement dit, la vulnérabilité des systèmes économiques et sociaux demeure inchangée quelle que soit la date et quel que soit le niveau de développement, ce qui ne permet pas de représenter les liens entre sensibilité aux impacts directs du changement climatique et niveau de développement. En particulier, on peut espérer que le développement des pays les moins avancés s'oriente à long-terme dans le sens d'une moindre vulnérabilité au climat et de manière plus générale, que dans 100-150 ans, nos connaissances sur le changement climatique, l'étendue de ses impacts, leurs répercussions potentielles *etc.*, soient suffisamment vastes pour qu'elles soient intégrées – si le phénomène est avéré – dans la structures des économies futures et l'organisation des sociétés futures.

Pour représenter ces deux effets – qui correspondent certes à une hypothèse optimiste –, R. Tol [Tol, 1999a, b] fait l'hypothèse d'une élasticité revenu de la vulnérabilité au changement climatique positive et inférieure à 1 : ainsi, pour un même niveau de changement climatique, plus une région se développe, plus sa vulnérabilité directe, en termes de pourcentage du revenu, décroît en tendant vers zéro (même si le montant absolu des dommages continue de croître – mais il croît moins vite que le revenu). Toute la question est bien sûr de calibrer cette élasticité puisque derrière se trouvent autant d'hypothèses sur les perspectives de développement, la structure des économies, la disponibilité des techniques et la mobilisation des potentiels d'adaptation, hypothèses pour lesquelles il est pour le moment impossible de recevoir un éclairage satisfaisant.

I.4. Quelles formes fonctionnelles sont couramment retenues ? Hypothèses et limites.

Intéressons-nous maintenant à la forme de la fonction employée pour relier amplitude du changement climatique, mesurée schématiquement par l'évolution de la température moyenne globale, et vulnérabilité d'une économie ou d'un secteur, c'est à dire les impacts monétisés en pourcentage du revenu régional ou de la contribution au revenu régional du secteur d'activité étudié. Rappelons que nous avons un seul point pour calibrer ces fonctions : c'est le résultat des trois études dont nous avons parlé au chapitre I et précédemment. Par hypothèse, on ajoute le *point 0* : pas de changement climatique, pas de dommages. Devant cette pauvreté des données,

on est donc conduit à choisir des formes simples pour limiter le nombre d'hypothèses supplémentaires au moment du calibrage. A cette limitation d'ordre pragmatique, qui nous restreint dans le choix d'une forme fonctionnelle, s'ajoute une motivation que nous avons évoquée au chapitre II au titre de l'incertitude paramétrique : les propriétés mathématiques des objets de modélisation (continuité, différentiabilité, convexité, ...) jouent bien souvent le rôle d'une *main invisible* pour guider nos choix de modélisation alors même que les formes mathématiques retenues peuvent être extrêmement restrictives pour refléter les propriétés des systèmes en question. Partant, quelles limitations supplémentaires dans la représentation des risques climatiques sont introduites avec les fonctions de dommages couramment employées ?

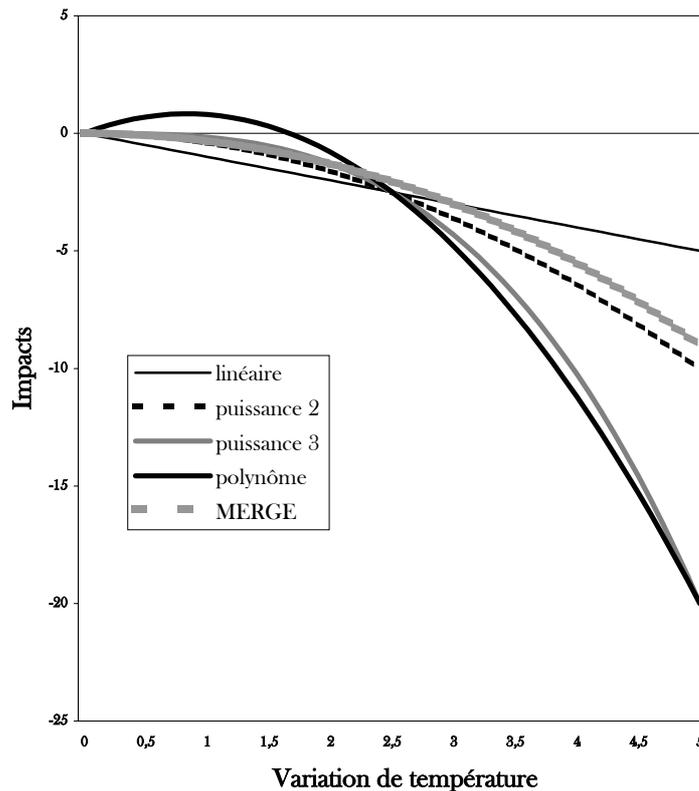


Figure VI-1. Formes fonctionnelles les plus fréquentes dans la littérature.

De manière générale, on rencontre dans la littérature sur le changement climatique cinq formes fonctionnelles (voir [Tol et Fankhauser, 1997] et [McCarthy et al., 2001], chap. XIX) : ce sont des fonctions *puissance* (linéaire, quadratique et cubique), des fonctions *polynômes* (de degré 2) et une forme particulière, présente seulement dans le modèle *MERGE* (*Model for Evaluating the Regional and Global Effects of greenhouse gas reduction policies*, [Manne et al., 1995; Manne et Richels, 1995, 1999]), sur laquelle nous reviendrons. Elles sont représentées Figure VI-1.

On rencontre ainsi des dommages *linéaires* dans *MERGE*, pour ce qui concerne les dommages dits marchands (ceux qui diminuent directement la production agrégée). Les dommages non-marchands (les pertes des aménités environnementales) sont quant à eux évalués via les consentements à payer, qui sont représentés au moyen d'une fonction relativement complexe – indiquée *MERGE* à la Figure VI-1, comparable à une fonction *puissance* d'exposant réel compris entre 1 et 2. Les dommages non-marchands reçoivent le même traitement dans *ICAM*

[Dowlatabadi et Morgan, 1993, 1995]. Dans les premières version du modèle *PAGE* (*Policy Analysis of the Greenhouse Effect*, [Hope et al., 1993; Hope et Maul, 1996]), les dommages sont *linéaires* ; dans des versions postérieures [Plambeck et Hope, 1996; Plambeck et al., 1997], les dommages sont représentés par des fonctions *puissance*, avec un exposant compris entre 1 et 3. Les premiers travaux de Nordhaus [Nordhaus, 1993a, b, 1994] ont considéré des fonctions *quadratiques* puis dans une seconde génération de travaux [Nordhaus et Boyer, 2000], des fonctions *polynômiales* de degré 2. Des versions récentes du modèle *FUND* (*climate Framework for Uncertainty, Negotiation and Distribution*, [Tol, 1999a, b]), comprennent selon les secteurs des fonctions *puissance* ou *polynômiales* de degré 2. Ce qui est également le cas des choix effectués par R. Mendelsohn et ses co-auteurs pour les fonctions de réponse du modèle *GIM* (*Global Impact Model*, [Mendelsohn et al., 1997, 2000]).

Cette grande diversité reflète les efforts des différentes équipes de modélisation intégrée du changement climatique pour représenter les trajectoires des dommages en l'absence d'informations sur ce point et explorer les conséquences de ces choix de modélisation sur les résultats des modèles (quota global d'émission, sentiers de taxes, ...). On peut constater à partir de la Figure VI-1 que les différentes formes de fonctions retenues font toutes l'hypothèse de dommages croissants : plus l'amplitude du changement climatique est importante, plus ses impacts et leurs répercussions socio-économiques sont importantes. C'est l'intuition générale qui ressort des nombreuses études d'impacts, telles que synthétisées de manière qualitative par le GIEC (voir *infra*, chapitre I, Figure I-1). Ces fonctions se différencient néanmoins sur deux points : l'éventualité de bénéfices retirés du changement climatique et la croissance des risques (la courbure de la fonction) quand le climat se réchauffe.

I.4.1. Réchauffement bénéfique, réchauffement défavorable : quelle forme fonctionnelle retenir ?

La question d'éventuels bénéfices pour un changement climatique de faible amplitude fait couler beaucoup d'encre et nous avons commencé à l'évoquer à la section précédente. Certes, il est envisageable que le changement climatique, en restant limité, se traduise par des régimes climatiques plus favorables pour certaines activités dans certaines régions : on pense bien sûr aux activités agricoles ou à la sylviculture pour les pays développés de l'hémisphère Nord (voir la première section du chapitre I et également [Mendelsohn et al., 1994; Smith et Hitz, 2002]). Mais dans cette éventualité, on doit se demander d'abord quelle confiance on place dans ces estimations de potentiels très attractifs ; ensuite même si le bénéfice semble avéré, si nous saurons vraiment en tirer parti (mise en place effective et à temps de stratégies d'adaptation appropriées pour tirer profit d'une configuration favorable du climat) et enfin, dans quelle mesure la transition vers ce nouvel état du climat ne s'accompagne pas de phases successives défavorables (on pense à l'exemple du dégel du permafrost dans les zones boréales).

Pour traduire l'existence d'un tel optimum – si on en admet l'éventualité, ce sont des fonctions polynômiales qui ont été utilisées : elles peuvent représenter des bénéfices pour un réchauffement d'amplitude faible et des pertes croissantes au-delà d'un certain seuil. Toute la difficulté est bien sûr de révéler l'optimum climatique pour chaque région et chaque secteur sachant que l'on ne possède de manière générale qu'un seul point et qu'il est nécessaire d'évaluer deux paramètres (les deux coefficients associés aux monômes de degré 1 et 2).

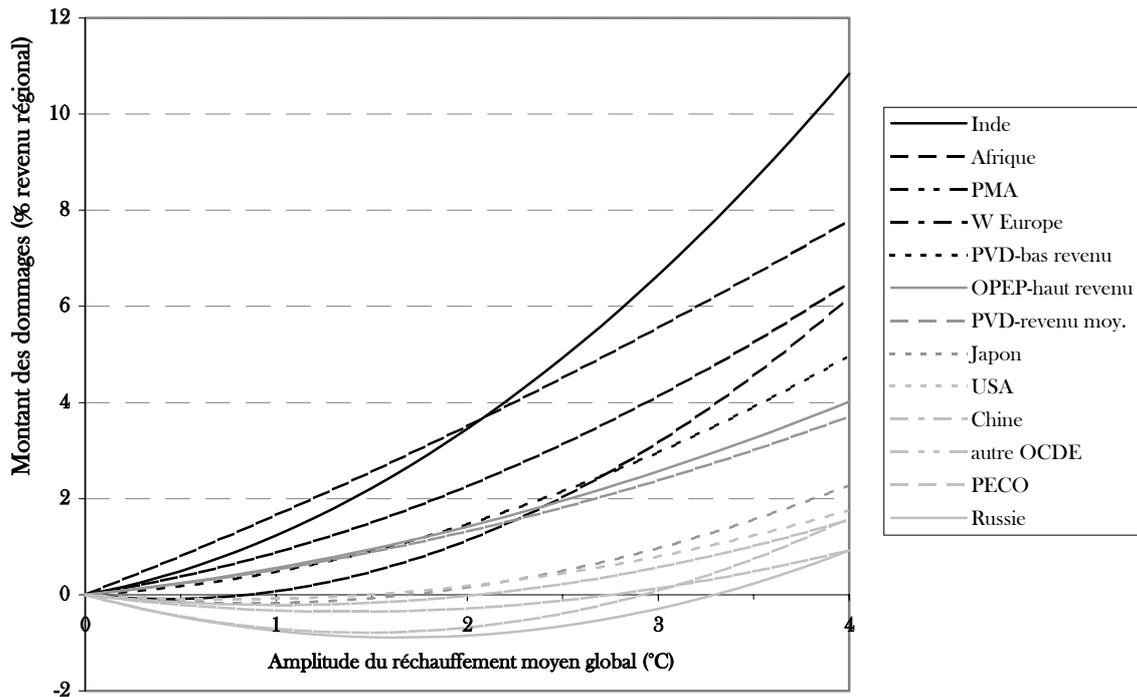


Figure VI-2. Fonctions de dommages régionalisées du modèle *RICE*.

De telles fonctions demeurent donc très spéculatives et on ne peut que s'interroger sur la robustesse des conclusions produites par les modèles qui les utilisent. On a représenté par exemple Figure VI-2 les fonctions de dommages du modèle *RICE* pour chacune de ses treize régions. Ce sont des polynômes du second degré ; les calibrations de W. Nordhaus le conduisent à estimer que six régions (les États-Unis, la Chine, le Japon, l'Europe de l'Ouest, les PECO, la Russie et les autres pays de l'OCDE non-mentionnés précédemment) peuvent être gagnantes au changement climatique, s'il reste d'une amplitude limitée (inférieure à +2°C en moyenne globale). Par ailleurs, à l'exception de l'Europe de l'Ouest où les impacts croissent très vite en raison d'un secteur agricole très exposé au changement climatique, quand tous ces pays cessent d'être bénéficiaires, les dommages y croissent relativement plus lentement que pour les autres groupes de pays.

Compte tenu de cette distribution des dommages et des caractéristiques des fonctions retenues, le groupe des pays bénéficiaires n'a donc pas d'intérêt immédiat à consentir des efforts importants de réduction des émissions. Or il se trouve qu'à l'exception de la Chine, tous ces gagnants en puissance appartiennent à l'Annexe B du Protocole de Kyoto. Bien plus, dans une telle configuration, les régions bénéficiaires peuvent compenser sans problème les régions les plus défavorisées par le changement climatique (des gains de 0,5 % du PIB en Amérique du Nord rattrapent sans problème - étant donné les écarts de développement socio-économique - des pertes en valeur relative beaucoup plus importantes dans les PVD et les PMA). Le modèle *RICE* conclut donc sans trop de surprise à l'absence de fondement du Protocole de Kyoto [Nordhaus et Boyer, 1999]. Mais de tels résultats dépendent des hypothèses très fortes formulées au moment d'évaluer les impacts par région et d'écrire les fonctions de dommages.

I.4.2. Croissance régulière de la vulnérabilité au changement climatique ou existences de seuils : limite des formes régulières couramment utilisées

Le second point important, quand on choisit une forme fonctionnelle, concerne la forme de cette fonction, sa courbure décrivant comment croît le dommage au fur et à mesure que le climat se réchauffe et qu'on s'écarte du point de calibrage : s'agit-il d'une croissance de plus en plus rapide (fonction convexe) ? est-ce au contraire une croissance à un rythme à peu près constant (fonction linéaire) ? s'agit-il d'une croissance régulière ou rencontre-t-on des phases d'accélération associées à la rencontre d'un seuil ? quelle image des risques à long-terme obtient-on ?

Les modèles intégrés *RICE*, *FUND* et *MERGE* - qui sont les trois seuls modèles intégrés coûts-bénéfice encore maintenus à afficher une ambition d'expertise et d'évaluation des politiques climatiques (en particulier le bien-fondé du Protocole de Kyoto) - font tous les trois l'hypothèse de fonctions de dommages régulières. Même si elles permettent de représenter des impacts d'autant plus importants que le changement climatique se poursuit, les trajectoires qu'elles décrivent restent graduelles et elles excluent par nature toute accélération soudaine dans les impacts supportés par une génération donnée dans une région donnée, accélération imputable au franchissement d'un seuil climatique (blocage de la mousson, interruption de la circulation thermohaline), environnemental (choc sur les productions agricoles, les ressources en eau) ou socio-économique (résultant par exemple des répercussions des chocs précédemment évoqués sur des populations particulièrement vulnérables) (voir Encadré VI-1).

Encadré VI-1. Un changement climatique abrupt ? Du climat aux répercussions socio-économiques des impacts, cinq niveaux d'amplification des dommages⁵.

Surprises climatiques et catastrophes climatiques

Les résultats récents de la paléoclimatologie mettent en lumière des situations où le climat a connu des transitions très brutales [Alley, 2002], comme les événements de type Dansgaard-Oeschger, qui sont peut être les changements climatiques les plus prononcés dans l'Atlantique nord sur les 120 000 dernières années [Rahmstorf, 2002]. Le forçage par l'homme du climat pourrait favoriser l'occurrence de tels phénomènes, qui conservent un caractère spéculatif. Parmi ceux aux conséquences importantes et largement réparties à l'échelle du globe, le GIEC en cite couramment trois : une interruption potentielle de la circulation thermohaline dans l'Atlantique nord, la fonte (d'une partie) des glaces du Groenland ou de l'ouest de l'Antarctique et le relargage massif de GES dans l'atmosphère à la suite du réchauffement du permafrost (avec un effet d'amplification du réchauffement) [McCarthy et al., 2001].

Modification de la variabilité du climat et événements météorologiques extrêmes

Selon [Palmer et Räisänen, 2002], les hivers particulièrement pluvieux en Europe (temps de retour : 40 ans), pourraient devenir beaucoup plus fréquents d'ici 2100. Sur de vastes régions du nord de l'Europe (Ecosse, Pays de Galles, Irlande, des Flandres au Danemark, côtes de la Baltique), leur temps de retour passe à 8 ans (5 fois plus fréquents qu'actuellement) ; sur l'Angleterre, la moitié nord de la France, l'Europe centrale, le nord de l'Italie, il croît d'un facteur 3 à 5 ; à l'inverse, sur une grande partie du pourtour méditerranéen, il est plus faible qu'aujourd'hui. Cette même étude s'est également intéressée à l'Asie des moussons où le risque de moussons particulièrement abondantes (temps de retour : 50 ans) deviendrait deux à trois fois plus important sur l'Inde du Nord, le Bangladesh et l'Asie du Sud-Est, avec un risque accru d'inondations au Bangladesh (sans tenir compte de l'effet de la hausse du niveau des mers). Pour ces pays, il pourrait s'agir d'un frein supplémentaire au développement, ce qu'illustre (en changeant de continent) la situation présente au Guatemala. L'état alimentaire et sanitaire des populations y est catastrophique. Si une désorganisation

⁵ Cet encadré reprend, en les résumant, des éléments tirés de [Ambrosi et Hourcade, 2003] (§ 2 et 3).

politique majeure en est principalement responsable, les catastrophes naturelles que subit cette région avec une régularité désespérante (ouragan Mitch (1998), sécheresse (trois ans durant), cyclone Michele (2001)) n'y sont pas non plus étrangères.

D'une transformation graduelle à une dégradation irréversible de l'environnement : évolution du climat et seuil de résilience des écosystèmes

Les récifs coralliens comptent parmi les écosystèmes les plus vulnérables à l'heure actuelle : 58% d'entre eux souffrent de surexploitation ou du développement des littoraux [Burke *et al.*, 1998]. En 1997-98, l'épisode de mort blanche des coraux à la suite d'anomalies climatiques (ENSO) laisse penser par son ampleur que le changement climatique pourrait s'ajouter aux facteurs qui conduisent à leur disparition. En effet, certains types de coraux, qui jouent un rôle très important dans l'édification et le maintien des récifs, croissent dès maintenant dans des eaux dont la température est proche de leur limite supérieure de tolérance thermique. Un réchauffement des eaux de surface de 1 ou 2°C (fourchette des scénarios du GIEC) conduirait au franchissement de ce seuil et par conséquent à une extinction massive et irrémédiable d'écosystèmes de première importance au sein des chaînes trophiques et des équilibres naturels de l'océan. Rappelons que les récifs coralliens constituent une source très importante de nourriture pour des centaines de millions de personnes, voire pour beaucoup leur unique source de protéines d'origine animale. Leur exploitation permet également d'engendrer travail et revenu par le biais du tourisme⁶, l'exportation des produits de la pêche ou de la vente de licences de pêche à des exploitants étrangers et dans beaucoup de cas, ce sont les seules sources de revenu et d'emploi [Spalding *et al.*, 2002]. La mort blanche des coraux et ses conséquences pour l'environnement et les populations locales pourraient entraîner en 2020 des pertes du PIB futur des petites îles du Pacifique de l'ordre de 40 à 50% [Hoegh-Guldberg *et al.*, 2000].

Nous venons de présenter trois sources majeures d'accélération dans les impacts, d'origine climatique ou environnementale. On imagine aisément leurs conséquences économiques et sociales et des travaux archéologiques récents [Haug *et al.*, 2003; Sandweiss *et al.*, 2001; Weiss *et Bradley*, 2001] ont d'ailleurs établi des coïncidences entre transition brutale du climat et mutation en profondeur des sociétés (changement de mode de subsistance, abandon des terres, désorganisation socio-politique). Il faut maintenant examiner deux autres sources d'accélération potentielle, qui sont liées à la réponse de l'économie et des sociétés aux modifications du milieu.

Points de rupture et phénomènes d'amplifications : non-linéarité dans le passage des impacts aux dommages

Pour une élévation de la température moyenne de 2°C, la surface disponible pour la culture du café en Ouganda serait dramatiquement réduite [Simonett, 1989]. L'agriculture représente la principale ressource du pays : elle fait vivre 90% des 22 millions d'habitants, engendre à elle seule 80% des emplois, représente près de 45% du PIB et 90% des exportations. La culture du café est majoritairement destinée à l'exportation et assurait jusqu'en 1999 près de 65% des revenus du pays en devises étrangères (Source : [FAO, 2002; World Bank, 2002b]). Si, les terres appropriées pour la culture du café étaient dramatiquement réduites, le dommage résultant ne se mesurerait pas seulement en termes de perte de productivité pour le secteur agricole. Il faudrait prendre en compte les conséquences macro-économiques à l'échelle nationale (déséquilibre de la balance des échanges, diminution du revenu d'une partie de la population), les conséquences sociales (chômage, déplacement de population en périphérie des zones urbaines) et leur répercussions régionales (flux de migrants vers les pays voisins). Cet exemple n'est bien sûr pas unique. Les populations fixées sur les atolls sont de même directement menacées par les différentes pressions que va exercer le changement climatique sur leur environnement (augmentation des surcôtes, submersion, pénurie d'eau, disparition des ressources liées aux récifs coralliens ; voir [Barnett *et Adger*, 2001; World Bank, 2002a]). Sans avoir l'ampleur des exemples précédents, sous nos latitudes, un certain nombre d'activités seront menacées (sports d'hiver, vulnérabilité de certaines cultures aux événements extrêmes).

Même des impacts dont le poids économique est négligeable pourront conduire finalement à des pertes en bien-être beaucoup plus importantes. Surtout, de tels chocs pourront se propager dans les circuits économiques et les tissus sociaux au-delà des zones qui les supportent initialement. La configuration qui revient fréquemment est celle des conflits locaux et phénomènes migratoires (*climate change refugees*) attisés par des ruptures locales qu'accélère le changement climatique [BMU, 2002]. La rareté croissante de l'eau et la désertification sont des déclencheurs évidents de ce type de mécanisme : les disponibilités en eau risquent

⁶ Secteur particulièrement vulnérable aux caprices du climat : les conséquences de l'épisode 97-98 de mort blanche des coraux sur les revenus touristiques sont estimées à une perte dans les années suivantes de 0,5 à 3 millions US\$ pour les Maldives (soit une baisse non négligeables des apports financiers d'une telle activité à l'économie du pays), source : [Buddemeier *et al.*, 2004].

de descendre en dessous du seuil de pénurie (500 m³/hab/an) dès 2025, dans cinq Etats du Sud et de l'Est de la Méditerranée et dans huit, en 2050 [Deneux, 2002]. Or ceci se produirait dans un contexte où les tensions pour l'accès à l'eau sont déjà fortes entre Etats et où l'explosion démographique conduit à des conflits croissants pour l'usage de l'eau entre centres urbains et activités agricoles. L'augmentation du niveau des mers pourrait aussi engendrer de tels flux migratoires, depuis le Bangladesh jusqu'aux petites îles de l'Océan Pacifique. Ainsi, le Premier Ministre de Tuvalu déclarait: "Tuvaluans are seeking a place they can permanently migrate to should the high tides eventually make our homes uninhabitable" [Barnett et Adger, 2001]. Mais on peut songer bien sûr à d'autres situations moins spectaculaires (impact de la fermeture des sports d'hivers dans certaines vallées, tensions sur l'eau en Europe du sud) avec la remise en question de la solidarité européenne en cas de transferts trop importants.

Rythme critique de changement climatique : risque de maladaptation en présence d'incertitude et d'inerties socio-économiques

Nos capacités de réaction sont limitées par l'effet de masque de la variabilité du climat qui brouille le signal du changement climatique (détection tardive du signal), par les incertitudes sur les évolutions à long-terme qui en perturbent l'interprétation (anticipation erronée), par les inerties socio-économiques qui introduisent un délai entre la décision de s'adapter et la mise en place de stratégies appropriées (mise en œuvre retardée). Si ces dernières sont dépassées par le rythme du changement climatique et du déploiement de ses impacts, les dommages résiduels seront d'autant plus importants et pourront connaître une phase d'accélération. [Yohe et Schlesinger, 1998] ont ainsi étudié les impacts d'une hausse du niveau de la mer le long des côtes des Etats Unis pour deux types d'anticipation (anticipation parfaite, myopie). Dans le second cas, une élévation du niveau de la mer de l'ordre de 1m peut augmenter le coût des impacts jusqu'à 50% par rapport à une situation où la hausse du niveau des mers est parfaitement connue et intégrée dans l'aménagement du territoire et les stratégies d'adaptation.

De tels événements reçoivent désormais une attention croissante et c'est dans cette perspective que les spécialistes des études d'impact ont souligné dans le troisième rapport du GIEC que les fonctions de dommages les plus couramment utilisées peuvent donner des représentations biaisées des phénomènes à l'œuvre : "Little is known about the shape of the aggregate impact function. Dynamic functions remain highly speculative at this point because the underlying models provide only a very rough reflection of real-world complexities. Although some analysts still work with relatively smooth impact functions, there is growing recognition that climate change dynamics in fact might be more complex and may not follow a monotonic path" ([McCarthy et al., 2001] chap. XIX, § 19.5.3). Et c'est précisément l'inquiétude dont fait part G. Yohe, en insistant sur le fait que l'éventualité de tels chocs n'a pas été suffisamment prise en compte dans le processus d'élaboration des politiques climatiques : "[my] biggest fear is that international policy is being made based on smooth climate change" (The Boston Globe, édition du 12 décembre 2001 - à l'occasion de la publication de la publication du rapport de l'Académie des sciences américaines consacré aux surprises du changement climatique [Alley, 2002]).

En conclusion on est donc amené à se demander dans quelle mesure on représente correctement les risques climatiques dans les modèles intégrés au moyen des fonctions de dommages. Nos connaissances sur les impacts potentiels du changement climatique et leurs répercussions socio-économiques sont encore très parcellaires et très fragiles - nous l'avons vu au chapitre I et nous l'avons rappelé ici -, en particulier pour obtenir une représentation dynamique des risques climatiques : la description d'un système en transition, avec de possibles seuils défavorables, et l'image des risques à long-terme, avec la question des dommages irréversibles et des catastrophes. Toutes ces limites se répercutent sur les choix des modélisateurs et la qualité des fonctions de dommages que nous sommes en mesure d'écrire en pâtit bien évidemment. Sur ce point, le troisième rapport du GIEC conclut d'ailleurs : "Aggregate damage functions used in integrated assessments are mostly illustrative. They should

be regarded as ‘placeholders’ that will be replaced by more accurate functional forms as our knowledge of impacts dynamics improves” ([McCarthy et al., 2001], chap. XIX, § 19.5.4.1).

Faute de mieux donc, en attendant ces inaccessibles fonctions de dommages, on bâtera les modèles intégrés avec des fonctions relativement simples, ayant le mérite de satisfaire des exigences analytiques et numériques et de ne pas trahir le peu que nous sachions sur les dommages. Ces simplifications ne sont pas critiquables en soi mais il est important de les avoir à l’esprit quand la majorité des modèles intégrés concluent à un effort modeste de réduction des émissions, au moins pendant les premières décennies [Kelly et Kolstad, 1999]. En effet, avant d’en tirer des conclusions définitives pour la décision publique, on doit bien comprendre d’une part, que certaines caractéristiques des risques climatiques ne sont pas convenablement représentées dans ces modèles et d’autre part, que les spécifications retenues par les modélisateurs peuvent dans une large mesure orienter les résultats.

II. Hypothèses sur les fonctions de dommages et trajectoires optimales d’émissions

Plusieurs facteurs expliquent – nous l’avons vu à la fin du chapitre I – que certains ne souhaitent pas recourir à l’analyse coût-bénéfice pour évaluer les politiques environnementales : en premier lieu, les difficultés d’évaluer les risques et de les représenter de manière fiable dans les modèles – et nous venons d’en discuter dans le cadre du changement climatique ; en second lieu, une certaine suspicion à l’égard de la méthode elle-même dans la manière dont elle traite des enjeux distributifs (par exemple, en faisant l’hypothèse d’une compensation entre groupes à l’intérieur d’une génération ; voir [Farrow, 1998] pour une revue de ces questions et des propositions pour les intégrer dans les calculs coût-bénéfice) et dont elle prend en compte les générations futures. Nous n’allons pas aborder ici les fondements théoriques et éthiques de l’actualisation (voir [Portney et Weyant, 1999], dans une perspective générale, et [Heal, 2001], pour la question des politiques environnementales), et ses liens avec l’équité inter-générationnelle et la question du leg entre générations ([Lecocq et Hourcade, 2003; Spash, 1994] mais on peut constater que dans le refus de l’analyse coût-bénéfice comme cadre d’analyse, le débat se porte d’emblée sur les liens entre actualisation et prise en compte des dommages : des dommages futurs vraisemblablement mal évalués (et sous-estimés) avec le risque de mettre en péril les générations futures, d’autant plus que leur importance est singulièrement diminuée par le jeu de l’actualisation.

C’est ce que nous allons examiner dans cette section en étudiant les liens entre spécifications des dommages, calcul inter-temporel et politiques climatiques optimales : parmi les incertitudes et hypothèses formulées pour pallier nos connaissances insuffisantes sur les risques, quelles sont les plus cruciales vis à vis de la décision ? Ne jouent-elles pas également le rôle d’une main invisible, en orientant les résultats des modèles ?

II.1. Une incertitude-clef : la forme de la fonction de dommages

Dans le foisonnement des modèles intégrés de première génération (entre 1990 et 1995) – où en raison de l’absence de données un tant soit peu robustes sur les risques climatiques, les

équipes ont exploré de très nombreuses manières d'écrire les fonctions de dommages et ont cherché à évaluer l'impact de telle ou telle hypothèse sur le comportement de leurs modèles, S. Peck et T. Teisberg ont examiné l'importance relative des deux incertitudes cruciales dans tout effort de modélisation des dommages : l'incertitude sur le point de calibrage - qui définit l'échelle de la fonction - et l'incertitude sur la forme de cette fonction (voir par exemple [Peck et Teisberg, 1993a, b; Peck et Teisberg, 1994]).

C'est à l'aide du modèle *CETA* (*Carbon Emissions Trajectory Assessment*) que les deux auteurs se livrent à cette exploration : d'abord avec une analyse de sensibilité des résultats du modèle (impacts sur le quota global d'émission et le niveau de la taxe carbone) puis en déterminant la valeur de l'information associée à chacune de ces deux incertitudes. La fonction de dommage est du type puissance et dans le cas central, il s'agit d'une fonction quadratique de l'amplitude du réchauffement moyen, calibrée autour du point $+3^{\circ}\text{C}$ / - 2 % du PIB. Pour l'incertitude à propos du paramètre d'échelle de la fonction, les auteurs examinent trois cas : à un réchauffement moyen de $+3^{\circ}\text{C}$, correspond successivement une perte de 1%, 2% et 3% du PIB; de même, pour l'incertitude sur la courbure de la fonction avec trois formes envisageables : linéaire, quadratique ou cubique. L'analyse de sensibilité révèle d'emblée que les politiques climatiques optimales sont beaucoup plus sensibles à l'incertitude sur le paramétrage de la forme de la fonction de dommage qu'à l'incertitude sur le niveau de dommages pour une élévation donnée de la température. Ces résultats sont confirmés par le calcul des valeurs de l'information : la valeur de l'information associée à l'exposant de la fonction est presque 6 fois supérieure à celle associée au coefficient d'échelle de la fonction. Les deux auteurs concluent : "*These results underscore the central importance of research designed to determine the costs of impacts and adaptation, and in particular to determine the degree of nonlinearity in costs as a function of temperature change*" [Peck et Teisberg, 1993b].

II.2. Courbure de la fonction de dommages et politiques climatiques optimales : une exploration numérique

Pour mesurer à quel point les résultats des modèles intégrés sont dépendant des hypothèses formulées sur la forme des fonctions de dommages, examinons les résultats d'une analyse de sensibilité à partir du modèle *DICE-94*. La fonction de dommage est ici une fonction puissance, qui s'écrit $a_1(\theta)^{a_2}$. Elle est calibrée autour de l'estimation suivante : un réchauffement de $+3^{\circ}\text{C}$ conduit à des dommages équivalents à une perte de PIB mondial de 1,33%. Dans la version de référence du modèle, a_2 , l'exposant de la fonction est fixé à 2 et le coefficient d'échelle, a_1 , vaut $1,33/9$. Que se passe-t-il si - tout en conservant le point de calibrage - on double l'exposant de la fonction : c'est à dire on a maintenant $a_2 = 1,33/81$ et $a_1 = 4$. Dans un cas limite, on choisit également $a_2 = 6$ d'où $a_1 = 1,33/729$.

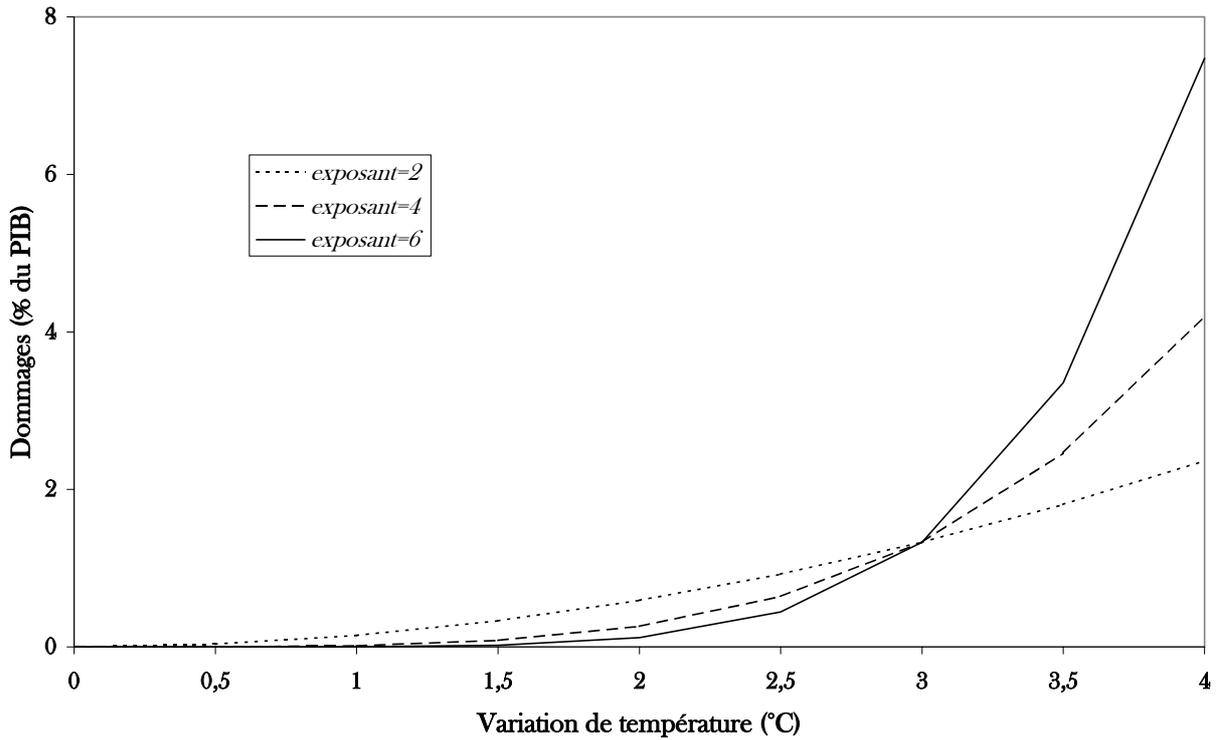


Figure VI-3. Fonctions de dommages utilisées pour l'analyse de sensibilité avec le modèle *DICE-94*.

Plus l'exposant croît, plus la fonction de dommages est convexe (voir Figure VI-3). Avant le point de calibrage, qui est commun aux trois courbes, elle est de plus en plus creusée avec des niveaux de dommages de plus en plus faibles, plus l'exposant de la fonction est élevé ; au-delà du point de calibrage, c'est l'inverse avec des risques de plus en plus importants pour des valeurs élevées de l'exposant. Autrement dit, en augmentant la convexité de la fonction, on diminue les risques à court-terme (l'amplitude du changement climatique est encore minime) mais on fait l'hypothèse de risques très importants et croissants de plus en plus vite à plus long-terme.

Comparons dans ces trois cas la réponse optimale du modèle (niveau d'efforts de réduction des émissions en % des émissions de référence) à court- (1995), moyen- et long-terme (2025 et 2095) (voir Tableau VI-1).

Exposant de la fonction de dommages	1995	2025	2095
2 (<i>référence</i>)	8,3	10,4	13,3
4	7,8	12,4	23,1
6	7,4	14,0	38,4

Tableau VI-1. Réponse optimale du modèle *DICE-94* (% des émissions de référence) pour trois formes de fonction de dommages.

On peut constater que le niveau d'effort à court-terme est paradoxalement moins intense (il diminue par rapport à la situation de référence de quelques 10%) quand l'exposant de la fonction de dommage croît (c'est à dire quand les risques de long-terme sont plus importants voire deviennent vite des préoccupations majeures). A moyen et long-terme, ces rapports s'inversent et plus les risques sont importants, plus les niveaux d'abattement croissent (cette fois jusqu'à presque tripler par rapport à la situation de référence).

Pour comprendre ces résultats paradoxaux (que des risques importants à long-terme conduisent finalement à des niveaux d'abattement faibles à court-terme), il faut examiner le chronogramme du dommage marginal actualisé, dont le profil dépend des hypothèses sur la fonction de dommages, les dynamiques naturelles (cycle du carbone et réponse du climat) et les paramètres de l'actualisation. En effet, toute décision d'abattement est prise en égalisant le coût marginal de cet effort à la somme actualisée des bénéfices marginaux (les dommages évités à la marge) retirés de cet effort. Nous allons l'évaluer dans une situation purement illustrative en calculant, pour chacune des fonctions de dommages étudiées, le bénéfice obtenu si on réduit à la période de Kyoto, en plus des engagements de Kyoto, les émissions de GES d'une tonne supplémentaire. Pour cet exercice numérique, nous retenons le scénario A1 et le cycle du carbone et le module d'évolution de la température moyenne globale du modèle *RESPONSE*.

C'est ce qui est représenté Figure VI-4. Regardons d'abord le graphique du haut, où on a représenté le bénéfice marginal non actualisé. A court-terme, le bénéfice retiré en réduisant les émissions de GES d'une tonne supplémentaire est beaucoup plus important lorsque l'exposant de la fonction de dommage est plus faible ; il croît cependant plus lentement. A plus long-terme (vers 2070 quand l'élévation de température moyenne globale est comprise en +2°C et +2,5°C), le bénéfice marginal est en revanche beaucoup plus important lorsque les fonctions de dommages sont davantage convexes. Les différences sont d'ailleurs significatives avec, par exemple, en 2100, des valeurs de 66, 120 et 164 US\$/tC pour les exposants 2, 4 et 6 respectivement, et en 2150, 130, 330 et 630 US\$/tC. Ceci peut se comprendre compte tenu des propriétés des fonctions de dommages que nous employons. Leur dérivée est de plus en plus creusée plus l'exposant croît, avec une valeur pivot comprise entre +2°C et +2,5°C : pour des réchauffements inférieurs à cette valeur, leurs dérivées sont de plus en plus faibles plus l'exposant de la fonction est élevé ; pour des réchauffement d'amplitude supérieure, c'est l'inverse avec une croissance de plus en plus rapide plus l'exposant est élevé.

Mais quand ces échéanciers sont actualisés (ici à 5 *%.an⁻¹*), les bénéfices à long-terme sont complètement estompés et seuls les bénéfices de court-terme, plus importants avec des fonctions puissance à faible exposant, ressortent. Dans ces conditions, la somme des bénéfices actualisés vaut 18,5 ; 16,3 et 16,8 US\$/tC pour les exposants 2, 4, 6 respectivement, justifiant des efforts d'abattement à court-terme plus importants quand les dommages sont de type quadratiques alors que les risques de long-terme sont paradoxalement les moins importants dans cette configuration.

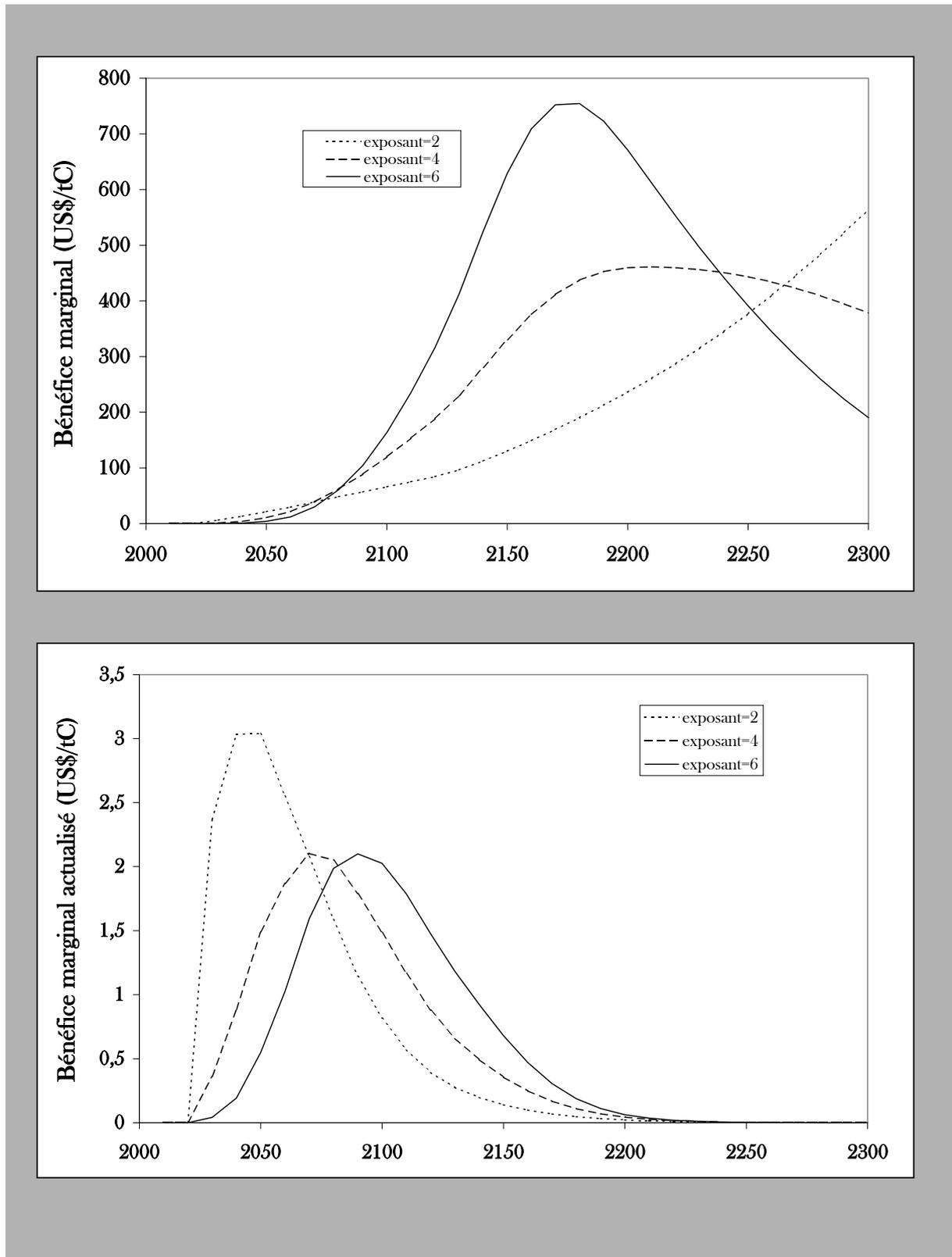


Figure VI-4. Chronogramme du bénéfice marginal pour trois formes de la fonction de dommages.

Bénéfice retiré à chaque date si on réduit en 2010 les émissions d'une tonne supplémentaire en plus des engagements de Kyoto. En haut, en valeur courante, en bas, en valeur actualisée (5 %/an^t).

En définitive, si les hypothèses concernant la forme de la fonction de dommage sont des paramètres cruciaux vis à vis de la décision, c'est parce qu'avec des déterminants environnementaux (cycle du carbone et dynamique du climat) elle participe à définir l'évolution dans le temps du dommage marginal. Or les stratégies optimales d'abattement vont dépendre de la course de vitesse entre croissance temporelle du dommage (marginal) et taux d'actualisation. Pour en comprendre les mécanismes et évaluer le jeu relatif de ces deux termes, examinons le modèle suivant, repris des travaux de [Lecocq, 2000] et [Ambrosi et al., 2003].

II.3. Jeu croisé de l'actualisation et profil temporel des dommages : un modèle analytique

On considère un modèle simple à deux périodes, référencées t_1 et t_2 , leurs dates initiales. Soient c_1 et c_2 les coûts d'abattement à chacune de ces deux périodes. Les dommages résultants, $D(c_1, c_2)$, se manifestent au-delà de ces deux dates. Soit η , le facteur d'actualisation ; on a $\eta = 1/(1 + \rho)$, ρ étant le taux d'actualisation. Soient n , le nombre d'année entre t_1 et t_2 , et m la distance entre t_1 et la date à laquelle se produisent les dommages du changement climatique ($m > n$).

On cherche à résoudre le programme suivant, qui est une minimisation du coût net des politiques climatiques :

$$\underset{c_1, c_2}{\text{Min}} \quad c_1 + \eta^n c_2 + \eta^m D(c_1, c_2).$$

Pour explorer les relations entre forme de la fonction de dommage et valeur du taux d'actualisation, on va décomposer la fonction de dommages en deux termes : un indicateur environnemental, $\theta(c_1, c_2)$, et une fonction de dommages *stricto sensu*, $\Psi(\theta)$. On écrit donc :

$$D(c_1, c_2) = \Psi[\theta(c_1, c_2)].$$

L'indicateur environnemental $\theta(.,.)$ permet de rendre compte de l'amplitude du changement climatique à la période où les dommages sont considérés, en reliant coût d'abattement aux deux périodes et niveau de protection de l'atmosphère et du climat. Il peut s'agir par exemple d'une mesure synthétique comme l'élévation de la température moyenne globale ou des niveaux de concentrations des GES. On donne à $\theta(.,.)$ la forme suivante :

$$\theta(c_1, c_2) = ac_1^\alpha + bc_2^\alpha \quad \text{avec } 0 < \alpha < 1 \text{ et } 0 < a < b.$$

Ainsi définie, la qualité de l'environnement est une fonction croissante des dépenses d'abattement aux deux périodes : si aucune mesure de réduction des émissions n'est entreprise, $\theta(.,.)$ est nul ; sinon, il croît. Pour relier les coûts d'abattement à l'indicateur environnemental, on se rappelle que les coûts d'abattement sont généralement donnés comme une fonction croissante et convexe des efforts d'abattement. En renversant une telle relation, il vient que la quantité d'émissions évitées à chaque période est une fonction croissante mais concave des coûts d'abattement - c'est ce que traduit le choix d'une fonction type racine, avec des « rendements environnementaux » décroissants. On fait ensuite l'hypothèse que le niveau de protection de l'atmosphère est une fonction linéaire des efforts à chaque période - ce que l'on

retrouve si, comme au chapitre V de cette thèse, on retient une équation linéaire pour le cycle du carbone. Pour traduire l'effet du progrès technique sur les fonctions de coût (un même montant investi dans des mesures d'abattement permet de réduire davantage les émissions en seconde période qu'en première période) et l'effet de *dépréciation* du cycle du carbone (un même effort de réduction des émissions contribue moins à augmenter la valeur de l'indicateur environnemental s'il est entrepris en première période que s'il est entrepris en seconde période - c'est ce que traduit le paramètre δ du modèle présenté au chapitre V), on choisit les coefficients de cette combinaison linéaire tels que $a < b$.

$\Psi(\cdot)$, quant à elle, représente une fonction de dommages « traditionnelle » avec l'hypothèse de risques décroissants quand la qualité de l'environnement s'améliore (θ (,,) croît). On fera l'hypothèse que $\Psi(\cdot)$ est une fonction continue à dérivée continue en retenant des fonctions *puissance* :

$$\Psi(\theta) = \theta^{-k} \text{ avec } k \geq 1.$$

Muni de ces notations, le programme précédent se réécrit :

$$\underset{c_1, c_2}{\text{Min}} J(c_1, c_2) = c_1 + \eta^n c_2 + \eta^m (ac_1^\alpha + bc_2^\alpha)^{-k}.$$

La solution optimale du programme précédent, (c^*, c^*) , satisfait aux conditions du premier ordre suivantes :

$$\begin{cases} J'_1(c_1^*, c_2^*) = 1 - \eta^m \alpha a k (c_1^*)^{\alpha-1} \left(a(c_1^*)^\alpha + b(c_2^*)^\alpha \right)^{-(k+1)} = 0 \\ J'_2(c_1^*, c_2^*) = 1 - \eta^{m-n} \alpha b k (c_2^*)^{\alpha-1} \left(a(c_1^*)^\alpha + b(c_2^*)^\alpha \right)^{-(k+1)} = 0 \end{cases}.$$

Pour s'assurer que la solution est bien minimum local, on doit par ailleurs avoir :

$$\begin{cases} J''_{11}(c_1^*, c_2^*) \cdot J''_{22}(c_1^*, c_2^*) - \left(J''_{12}(c_1^*, c_2^*) \right)^2 > 0 \\ J''_{11}(c_1^*, c_2^*) > 0 \end{cases}.$$

On a :

$$\begin{cases} J''_{11}(c_1^*, c_2^*) = \eta^m \alpha a k (c_1^*)^{\alpha-2} \left(a(c_1^*)^\alpha + b(c_2^*)^\alpha \right)^{-(k+2)} \left[(1-\alpha) \left(a(c_1^*)^\alpha + b(c_2^*)^\alpha \right) + \alpha a (k+1) (c_1^*)^\alpha \right] \\ J''_{22}(c_1^*, c_2^*) = \eta^m \alpha b k (c_2^*)^{\alpha-2} \left(a(c_1^*)^\alpha + b(c_2^*)^\alpha \right)^{-(k+2)} \left[(1-\alpha) \left(a(c_1^*)^\alpha + b(c_2^*)^\alpha \right) + \alpha b (k+1) (c_2^*)^\alpha \right] \\ J''_{12}(c_1^*, c_2^*) = \eta^m \alpha^2 a b k (k+1) (c_1^* c_2^*)^{\alpha-1} \left(a(c_1^*)^\alpha + b(c_2^*)^\alpha \right)^{-(k+2)} \end{cases}$$

On peut vérifier que $J''_{11}(c_1^*, c_2^*)$ est bien strictement positif comme somme et produit de nombres strictement positifs ; de même, $J''_{22}(c_1^*, c_2^*)$. Par ailleurs, on a :

$$\left\{ \begin{array}{l} J_{11}''(c_1^*, c_2^*) J_{22}''(c_1^*, c_2^*) = \eta^{2m} \alpha^2 ab k^2 (c_1^* c_2^*)^{\alpha-2} \left(a(c_1^*)^\alpha + b(c_2^*)^\alpha \right)^{-2(k+2)} \dots \\ \dots \left[(1-\alpha) \left(a(c_1^*)^\alpha + b(c_2^*)^\alpha \right) + \alpha a(k+1)(c_1^*)^\alpha \right] \dots \\ \dots \left[(1-\alpha) \left(a(c_1^*)^\alpha + b(c_2^*)^\alpha \right) + \alpha b(k+1)(c_2^*)^\alpha \right] \\ (J_{12}''(c_1^*, c_2^*))^2 = \eta^{2m} \alpha^4 (ab)^2 k^2 (k+1)^2 (c_1^* c_2^*)^{2\alpha-2} \left(a(c_1^*)^\alpha + b(c_2^*)^\alpha \right)^{-2(k+2)} \end{array} \right.$$

Il vient :

$$\begin{aligned} & \frac{J_{11}''(c_1^*, c_2^*) J_{22}''(c_1^*, c_2^*)}{(J_{12}''(c_1^*, c_2^*))^2} \\ &= \frac{\left[(1-\alpha) \left(a(c_1^*)^\alpha + b(c_2^*)^\alpha \right) + \alpha a(k+1)(c_1^*)^\alpha \right] \left[(1-\alpha) \left(a(c_1^*)^\alpha + b(c_2^*)^\alpha \right) + \alpha b(k+1)(c_2^*)^\alpha \right]}{\alpha^2 (ab)(k+1)^2 (c_1^* c_2^*)^\alpha}, \\ &= 1 + \underbrace{\frac{(1-\alpha) \left(a(c_1^*)^\alpha + b(c_2^*)^\alpha \right) \left[(1-\alpha) \left(a(c_1^*)^\alpha + b(c_2^*)^\alpha \right) + \alpha a(k-1)(c_1^*)^\alpha + \alpha b(k-1)(c_2^*)^\alpha \right]}{\alpha^2 (ab)(k-1)^2 (c_1^* c_2^*)^\alpha}}_{>0} \end{aligned}$$

d'où $J_{11}''(c_1^*, c_2^*) \cdot J_{22}''(c_1^*, c_2^*) - (J_{12}''(c_1^*, c_2^*))^2 > 0$. On est donc bien assuré que la solution optimale est un minimum local.

A partir des conditions du premier ordre, on trouve en particulier :

$$\frac{c_1^*}{c_2^*} = \left(\frac{b}{a} (1+\rho)^n \right)^{\frac{1}{\alpha-1}} < 1 \quad \text{car} \quad \begin{cases} \frac{b}{a} (1+\rho)^n > 1 \quad (b > a > 0 \text{ et } (1+\rho)^n > 1) \\ \frac{1}{\alpha-1} (< -1) < 0 \quad (0 < \alpha < 1) \end{cases}.$$

C'est à dire que le rapport des coûts d'abattement entre les deux périodes est indépendant des dommages mais dépend ici seulement des paramètres de l'actualisation et des cycles naturels⁷. De l'expression précédente, on trouve que les coûts d'abattement à la première période sont systématiquement inférieurs aux coûts à la seconde ; comme les coûts d'abattement sont par hypothèse des fonctions croissantes du niveau d'effort et comme les coûts sont diminués sous l'effet du progrès technique entre les deux périodes, on trouve que le niveau d'effort en première période est systématiquement inférieur à celui de seconde période.

Maintenant, si le taux d'actualisation passe de ρ à ρ' , examinons comment évolue la solution optimale du programme. Pour le niveau de dépenses d'abattement en première période, on trouve - à partir des conditions du premier ordre (où ' indique la valeur des variables pour le nouvel optimum) :

⁷ Les coûts d'abattement (et l'intensité des efforts qui leur est moins que proportionnelle) dépendent, eux, bien sûr des spécifications relatives aux dommages (voir les conditions du premier ordre).

$$\frac{c_1^{*\prime}}{c_1^*} = \left(\frac{1+\rho'}{1+\rho} \right)^{\frac{m}{\alpha-1}} \left(\frac{a(c_1^{*\prime})^\alpha + b(c_2^{*\prime})^\alpha}{a(c_1^*)^\alpha + b(c_2^*)^\alpha} \right)^{\frac{(k+1)}{(\alpha-1)}}.$$

On peut d'emblée noter que le déplacement de la solution optimale de c^* vers $c^{*\prime}$ quand le taux d'actualisation passe ρ de à ρ' dépend des termes de l'actualisation, des coûts des mesures d'abattement, des paramètres environnementaux et pour ce qui concerne la fonction de dommages, seulement de sa courbure (si on avait ajouté un paramètre d'échelle - classiquement, sous forme de coefficient multiplicatif, il aurait disparu dans le quotient).

Plus précisément, le déplacement de la solution optimale dépend du produit de deux termes. Le premier terme traduit l'effet direct de l'actualisation, effet retard qui conduit à repousser dans le temps toute dépense, plus le taux d'actualisation prend une valeur élevée. On a en effet :

$$\begin{cases} 0 < \rho < \rho' \Rightarrow (0 <) 1 < \frac{1+\rho'}{1+\rho} \Rightarrow 0 < \left(\frac{1+\rho'}{1+\rho} \right)^{\frac{m}{\alpha-1}} < 1. \\ 0 < \alpha < 1 \Rightarrow \frac{m}{\alpha-1} (< -1) < 0 \end{cases}$$

Le second terme fait intervenir le dommage marginal, dans le sens d'une diminution (resp. d'une augmentation) des efforts d'abattement en première période plus l'indicateur environnemental croît (resp. décroît) en réponse à une variation du taux d'actualisation de ρ à ρ' - on se rappelle que l'exposant $(k+1)/(\alpha-1)$ est strictement négatif. Il joue donc le rôle d'une force de rappel par rapport au premier terme. En effet, si le taux d'actualisation croît en passant de ρ à ρ' , alors l'effet direct conduit à diminuer les investissements de réduction des émissions en première période ce qui implique (les dépenses de protection de l'environnement aux deux périodes évoluant dans le même sens) que l'indicateur environnemental décroît ; la qualité de l'atmosphère et du climat se dégradant, l'effet du dommage marginal (second terme) conduit à l'inverse à accroître les dépenses de réduction des émissions.

Examinons la compétition entre ces deux effets. Pour commencer, utilisons la relation précédemment établie entre c_2^* et c_1^* pour substituer c_1^* à c_2^* dans la première des conditions du premier ordre :

$$1 - \eta^m \alpha a^{-k} k (c_1^*)^{-\alpha(k+1)} \left(1 + \eta^{\frac{m\alpha}{\alpha-1}} \left(\frac{a}{b} \right)^{\frac{1}{\alpha-1}} \right)^{-(k+1)} = 0.$$

Finalement, on trouve :

$$\frac{c_1^{*\prime}}{c_1^*} = \left(\frac{1+\rho'}{1+\rho} \right)^{\frac{m}{\alpha k+1}} \left(\frac{1 + (1+\rho')^{\frac{m\alpha}{1-\alpha}} \left(\frac{a}{b} \right)^{\frac{1}{\alpha-1}}}{1 + (1+\rho)^{\frac{m\alpha}{1-\alpha}} \left(\frac{a}{b} \right)^{\frac{1}{\alpha-1}}} \right)^{\frac{(k+1)}{(\alpha k+1)}}.$$

Le premier terme du produit traduit bien l'effet direct de l'actualisation, avec une diminution des dépenses d'abattement en première période si le taux d'actualisation croît (l'exposant

$m/(\alpha k+1)$ est strictement positif). Le second terme, qui représente l'influence de la courbure de la fonction de dommage, plaide en revanche en faveur d'une augmentation des dépenses :

$$\left\{ \begin{array}{l} (0 <) \rho < \rho' \\ 0 < \alpha < 1 \\ 0 < n \end{array} \right. \Rightarrow 0 < \frac{n\alpha}{1-\alpha} \Rightarrow 0 < (1+\rho)^{\frac{n\alpha}{1-\alpha}} < (1+\rho')^{\frac{n\alpha}{1-\alpha}} \Rightarrow \frac{1 + (1+\rho')^{\frac{n\alpha}{1-\alpha}} \left(\frac{a}{b}\right)^{\frac{1}{\alpha-1}}}{1 + (1+\rho)^{\frac{n\alpha}{1-\alpha}} \left(\frac{a}{b}\right)^{\frac{1}{\alpha-1}}} \left(\frac{a}{b}\right)^{\frac{1}{\alpha-1}} > 1.$$

$$k(>1) > 0 \Rightarrow \frac{(k+1)}{(\alpha k+1)} > 0$$

Evaluons numériquement l'ordre de grandeur de cette variation. On retient $\alpha=1/3$ (ce qui correspond à des coûts marginaux d'abattement quadratiques) et $a/b=1/2$. En outre, la première période dure 25 ans et la seconde une centaine d'années. Les résultats sont présentés au Tableau VI-2.

Exposant de la fonction de dommages	$\rho \rightarrow \rho'$			
	1→2	3→4	5→6	8→9
k=1	-44,9	-43,9	-42,9	-41,6
k=3	-26,1	-24,9	-23,9	-22,6
k=6	-10,1	-8,9	-7,9	-6,7
k=10	+1,4	+2,7	+3,7	+4,8

Tableau VI-2. Variation (% de la valeur initiale) du montant des dépenses d'abattement à la première période quand le taux d'actualisation croît de 1 point (+1 %.*an*'), pour différentes valeurs de l'exposant de la fonction de dommages.

On peut constater que plus l'exposant de la fonction de dommage est élevé (plus elle se creuse donc), moins l'effet direct de l'actualisation l'emporte sur l'effet de la courbure de la fonction de dommages : la décroissance des dépenses d'abattement en première période est en effet de moins en moins marquée ; voire, pour de très grandes valeurs de k , c'est l'effet de la courbure de la fonction de dommages qui domine, avec une augmentation des dépenses en première période.

Au moment de conclure cette section, il serait toutefois trompeur de se concentrer sur le seul rôle de la forme de la fonction de dommage sur le niveau de la réponse optimale de court-terme. En dépit de son importance que nous venons de souligner, d'autres caractéristiques des systèmes naturels et socio-économiques jouent un rôle clef dans cette course de vitesse entre actualisation et profil temporel du dommage marginal. Ce sont entre autres (a) le scénario de développement socio-économique qui dicte le profil des émissions de GES et leurs coûts de réduction et - dans un modèle de croissance standard - le niveau du taux d'actualisation (avec bien sûr les préférences des individus) et (b) la dynamique du climat de court-terme, en réponse à un scénario d'émissions donné.

Pour évaluer l'influence de ces déterminants sur les niveaux d'abattement à court-terme, nous avons introduit une série d'aménagements successifs dans le modèle *DICE* sans en modifier la fonction de dommages. Nous sommes partis de la version *DICE-99*. La fonction de dommage est un polynôme du second degré : ses deux coefficients sont négatifs (il n'y a donc pas de bénéfices à l'échelle globale pour un changement climatique de faible amplitude) et elle est

calibrée autour de l'estimation suivante : un réchauffement de +2,5°C entraîne une perte du revenu mondial de 1,5%. Elle a pour argument la variation de température moyenne globale depuis 1900 ; pour assurer un caractère comparable à nos résultats, nous avons reformulé le modèle de sorte que l'argument de cette fonction soit désormais l'amplitude du réchauffement moyen global depuis 1995.

Scénario d'émissions de référence :

Les émissions de référence du modèle *DICE* croissent de manière régulière, en prolongeant les tendances des décennies 1980 et 1990 ; en 2010, elles atteignent 8,78 GtC et en 2020, 9,05 GtC. En cela, elles sont très proches des émissions du scénario marqueur de la famille B2 des scénarios SRES. C'est une hypothèse très conservatrice finalement et les scénarios des familles A1 et A2 correspondent par exemple à des trajectoires d'émissions croissant beaucoup plus rapidement. C'est pour mesurer l'influence de ces hypothèses à propos des sentiers d'émissions sur les niveaux d'abattement à court- et moyen-terme que nous avons retenu pour cet exercice les émissions du scénario A1, avec des valeurs en 2010 et 2020 respectivement de 10,88 GtC et 12,64 GtC.

Réponse du climat à court-terme :

Le module climatique du modèle *DICE* est un modèle simplifié, très similaire dans son approche au modèle que nous avons présenté au chapitre IV. Cependant, et c'est là toute la différence, les compartiments considérés sont différents : un compartiment qui regroupe l'atmosphère et l'océan de surface et un compartiment qui représente l'océan profond. Il s'agit ainsi d'un modèle caractérisé par une inertie temporelle importante (l'échange de chaleur entre les deux compartiments s'effectuant sur des échelles de temps longues, centaines voire millénaires) et par une « force de rappel » importante (la capacité calorifique de l'océan profond étant très élevée). Un tel choix de modélisation est justifié pour des projections à long-terme où le processus de rééquilibrage thermique entre atmosphère et océan de surface peut être considéré comme rapide en regard du rééquilibrage avec l'océan profond mais, on l'a vu au chapitre IV, un tel choix tend à sous-estimer l'amplitude du réchauffement moyen global sur le siècle à venir. Pour cette raison, nous avons substitué aux équations d'origine du modèle *DICE* les équations du modèle d'évolution de la température moyenne globale présenté au chapitre IV (en ajustant la sensibilité du climat pour qu'elle soit égale à celle de *DICE*, proche de +3°C).

La Figure VI-5 montre qu'en modifiant soit les émissions de référence, soit le module climatique, on obtient en 2015 des taux d'abattement plus élevés : on passe de 5,6% à 9,3 % et 9,9% respectivement (presque le double). Quand on effectue les deux modifications simultanément, le taux d'abattement est plus que doublé : on passe alors de 5,6% à 12,3%. Ces résultats ne prétendent pas être définitifs sur la validité du Protocole de Kyoto. Ils soulignent simplement combien le niveau d'effort de réduction des émissions est dépendant des choix de modélisation effectués en plus de la question de la valeur du taux d'actualisation et des hypothèses sur les risques climatiques.

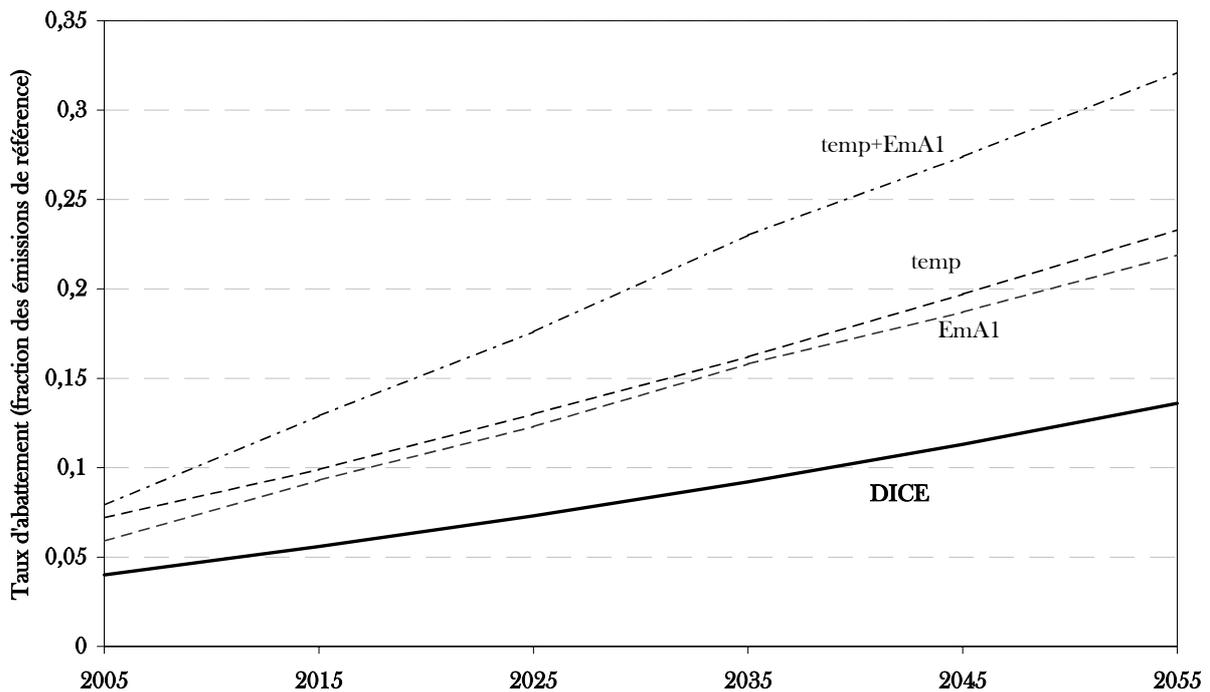


Figure VI-5. Taux d'abattement des émissions de référence pour le modèle DICE et pour une version modifiée : émissions de référence A1 (EmA1), réponse du climat (temp) puis les deux (temp+EmA1).

Nous venons de voir qu'un des éléments essentiels qui gouvernent le niveau d'efforts (en particulier à court-terme) concerne le jeu relatif entre le profil d'évolution temporel du dommage marginal et les termes de l'arbitrage inter-temporel. C'est en ce sens que l'on peut dire que le choix d'une forme fonctionnelle donnée pour représenter les dommages jouera le rôle d'une main invisible et orientera les résultats : à partir d'un même point de calibrage, retenir une fonction plus ou moins convexe implique des efforts à court-terme plus ou moins importants. De même, les choix de modélisation pour représenter la dynamique des systèmes naturels, qui, à fonction de dommages déterminée, influencent les trajectoires optimales d'émissions puisqu'ils participent également à définir comment évolue le profil du dommage marginal au cours du temps.

Dans cette configuration, où l'incertitude sur les paramètres que nous venons d'étudier est déterminante pour la décision, il est plus important – et plus correct scientifiquement – de fournir des résultats exprimés en termes de fourchettes d'incertitude qu'en lien avec un seul jeu d'hypothèses. C'est pourquoi, pour la dernière section de ce chapitre, nous allons nous concentrer sur l'incertitude relative aux différents maillons au long de la chaîne causale émissions-dommages qui contrôlent l'évolution temporelle du dommage marginal, à savoir l'incertitude sur la dynamique du climat et l'incertitude sur la forme de la fonction de dommages.

III. Rôle de l'incertitude sur la dynamique du climat et des croyances sur les dommages dans l'analyse coût-bénéfice

Nous avons vu à la fin de la première section qu'une question importante pour l'élaboration des politiques climatiques concerne d'éventuelles accélérations dans les dommages, pouvant s'amorcer aux différents maillons de cette chaîne (voir Encadré VI-1). Nous n'allons pas ici traiter des surprises et des catastrophes climatiques. Nous prenons en compte l'incertitude sur la dynamique du climat selon les mêmes modalités qu'aux chapitres IV et V : un changement climatique graduel, dont l'amplitude est incertaine compte tenu de l'incertitude sur la sensibilité du climat. Cette incertitude peut cependant impliquer un risque d'accélération des dommages : dans l'éventualité où la sensibilité du climat est élevée (ici, +4,5°C), on se déplace en effet beaucoup plus « rapidement » au long de la fonction de dommages que si ce paramètre occupe des valeurs plus basses. Nous allons en revanche étudier l'éventualité de singularités dans la réponse des écosystèmes, des activités productives et plus largement des systèmes socio-économiques, singularités liées au franchissement de seuils de résilience environnementaux, sociaux ou économiques même dans l'hypothèse d'un changement climatique graduel.

La première section de ce chapitre se conclue par l'impossibilité de représenter de tels événements au moyen des fonctions de dommages régulières, qui sont les plus couramment utilisées. En effet, en prenant comme exemple la fonction de dommages du modèle *DICE-94* (voir *supra*, II.2.), pour obtenir une perte équivalente à 10% du revenu, on doit :

- soit atteindre un réchauffement global d'une amplitude supérieure à 8°C - alors que beaucoup d'études d'impacts laissent entendre que de tels seuils pourraient être franchis pour des valeurs bien inférieures (voir la discussion sur le choix d'un seuil de réchauffement dangereux au chapitre IV et les exemples de l'Encadré VI-1) ;
- soit retenir un exposant plus élevé pour la fonction (par exemple, s'il vaut 4, une perte de l'ordre de 10% du revenu est réalisée dès +5°C) - et on en a vu l'impact sur la décision optimale à la deuxième section ;
- soit augmenter le paramètre d'échelle (ce qui permet de conserver la convexité de la fonction) mais on obtient vite, dans ce cas, des valeurs peu crédibles pour les dommages à long-terme.

Une alternative pour représenter des épisodes d'accélération dans les dommages associés au franchissement de seuils sans faire l'hypothèse d'un réchauffement d'amplitude très élevée ni de dommages à long terme significatifs est d'utiliser une fonction sigmoïde à l'instar de [*Dumas et Ha Duong*, 2001] :

$$\Phi(\Delta\theta) = \frac{d}{1 + \left(\frac{2-e}{e}\right)^{\frac{K+Z-2\Delta\theta}{K-Z}}} Y$$

où $\Delta\theta$ désigne l'amplitude du changement climatique en cours, mesurée de manière synthétique avec la variation de la température moyenne globale,

K, Z bornes supérieures et inférieures de l'intervalle de transition catastrophique (voir *infra*),

- e paramètre de courbure de la fonction,
- d coefficient d'échelle, indiquant quelle fraction du revenu est perdue sous l'effet d'un changement climatique d'amplitude $\Delta\theta$,
- Y le niveau de revenu.

Avec une telle fonction, tant que l'amplitude du changement climatique reste limitée ($\Delta\theta < Z$), les dommages demeurent négligeables. En revanche, si l'amplitude du changement climatique est comprise dans l'intervalle de transition catastrophique ($Z < \Delta\theta < K$), alors les dommages croissent très rapidement jusqu'à $d\%$ du revenu (le paramètre e gouverne la rapidité du saut). Au-delà ($K < \Delta\theta$), les dommages plafonnent à cette valeur. Pour conserver avec des hypothèses comparables aux exercices numériques des chapitres IV et V, nous centrons l'intervalle de transition catastrophique autour de $+2^\circ\text{C}$ ($Z=+1,7^\circ\text{C}$; $K= 2,3^\circ\text{C}$); e est fixé à 0,01.

Pour examiner l'articulation des incertitudes à propos de la dynamique du climat et la forme de la fonction de dommages, nous avons entrepris deux jeux de simulations numériques :

- dans le premier cas, la sensibilité du climat est incertaine et nous comparons les recommandations du modèle *RESPONSE_Δ* pour des fonctions de dommages quadratiques et sigmoïdes, calibrées autour du même point ;
- dans le second cas, la sensibilité du climat est connue (fixée à sa valeur centrale : $+3,5^\circ\text{C}$) et nous comparons les trajectoires optimales d'émissions pour différentes croyances du planificateur central sur l'éventualité de seuils dans les dommages.

III.1. Fonctions de dommages à seuils vs fonctions de dommages quadratiques en présence d'incertitude sur la sensibilité du climat

Dans cette section, nous allons examiner comment les spécifications des fonctions de dommages influencent le timing des politiques de réduction des émissions en présence d'incertitude sur la sensibilité du climat. En particulier, selon la forme de la fonction de dommage - dont nous avons qu'il s'agit d'un paramètre important vis à vis de la décision -, l'incertitude sur la dynamique du climat a-t-elle toujours la même importance ?; implique-t-elle des efforts de court-terme plus ou moins prononcés ?; quelle est la valeur de l'information qui lui est associée ?

Nous retenons deux types de fonctions de dommages: des fonctions quadratiques et des fonctions à seuil. Dans le premier cas, la fonction de dommages est de la forme suivante :

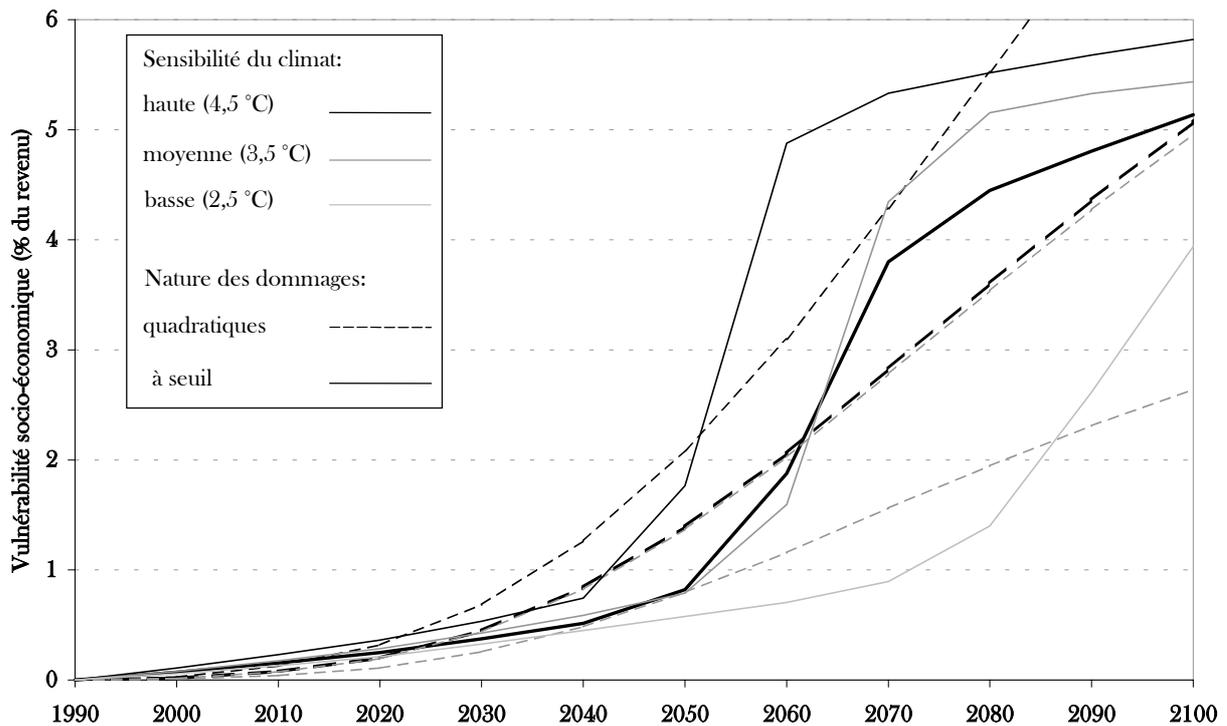
$$\Phi(\Delta\theta) = \alpha (\Delta\theta)^2 Y$$

- où $\Delta\theta$ désigne l'amplitude du changement climatique en cours, mesurée de manière synthétique avec la variation de la température moyenne globale,
- α coefficient d'échelle, indiquant quelle fraction du revenu est perdue sous l'effet d'un changement climatique d'amplitude $\Delta\theta$ ($\alpha = 0,6 \text{ \%} \cdot \text{C}^{-2}$),
- Y le niveau de revenu.

Dans le second cas, on cherche à représenter l'éventualité d'accélération soudaines dans les impacts du changement climatique, associées au franchissement de seuils de vulnérabilité. La fonction de dommages s'écrit comme la somme de deux termes :

$$\Phi(\Delta\theta) = \frac{d}{1 + \left(\frac{2-e}{e}\right)^{\frac{K+Z-2\Delta\theta}{K-Z}}} Y + \beta(\Delta\theta)Y.$$

Le premier terme est une fonction logistique avec un intervalle de transition catastrophique compris entre +1,7°C et +2,3°C, ce qui reste comparable avec un seuil dangereux de réchauffement fixé à +2°C pour les simulations en mode coût-efficacité. Avec cette fonction, le dommage tend vers $d = 4\%$ du revenu. Pour obtenir un profil de dommages relativement comparable à ce que l'on obtient avec une fonction quadratique, on a ajouté à ce premier terme un terme linéaire ($\beta = 0,5 \text{ \%} \cdot \text{C}^{-1}$). Voir la Figure VI-6., où on a représenté, pour le scénario d'émissions A1, les trajectoires des dommages quadratiques ou à seuil selon la valeur de la sensibilité du climat et l'espérance de ces trajectoires pour chaque catégorie avec une croyance centrée sur la sensibilité du climat (voir *infra*). Jusqu'à la fin du siècle, les profils restent relativement similaires mais divergent au-delà, avec des niveaux de dommages beaucoup plus



importants et croissant plus vite pour des fonctions quadratiques.

Figure VI-6. Profils des dommages au XXI^{ème} siècle pour le scénario A1-m.

Pour trois valeurs de la sensibilité du climat (du gris clair au noir, quand ce paramètre croît) et les deux fonctions de dommages présentées précédemment. En trait gras, l'espérance pour une croyance centrée sur la sensibilité du climat des dommages de chaque catégorie.

La sensibilité du climat est incertaine et on considère trois états du monde (s), caractérisés par la valeur que peut prendre ce paramètre, respectivement $\{+2,5^\circ\text{C} ; +3,5^\circ\text{C} ; +4,5^\circ\text{C}\}$. A ces trois états du monde sont associées les probabilités subjectives *ex ante* p_s . On envisage ici le cas d'une croyance *centrée* $\{1/6 ; 2/3 ; 1/6\}$, *optimiste* $\{2/3 ; 1/6 ; 1/6\}$ et *pessimiste* $\{1/6 ; 1/6 ; 2/3\}$. Comme aux chapitres précédents, nous considérons que l'incertitude sur la sensibilité du climat peut être levée au début de chaque décennie du siècle (t_{info} compris entre 2000 et 2100), en incluant deux cas polaires, information parfaite ($t_{info} = 1990$) et incertitude complète ($t_{info} = 2300$, l'horizon du modèle).

Ces spécifications pour ce qui concerne les trajectoires des dommages, l'incertitude et l'arrivée d'information ont été introduites dans le modèle *RESPONSE_Δ* (voir Encadré VI-2), modèle coût-bénéfice de recherche de politiques climatiques optimales. L'objectif du planificateur central est de maximiser l'espérance sur les trois états du monde de l'utilité inter-temporelle des générations successives, dont le bien-être dépend de la consommation *per capita* courante diminuée des coûts d'abattement, $f(.)$, et des dommages résiduels, $\Phi(.)$. On fait l'hypothèse que la fonction d'utilité est une fonction logarithme népérien et qu'à chaque période, le revenu (Y) est réparti uniformément au sein de la population (N). Dans l'objectif du planificateur, le bien-être de l'agent représentatif de chaque génération est pondéré par la taille de la population à cette génération et par un facteur d'actualisation (η , la préférence pure pour le présent, valant 3 %. an^{-1}).

Encadré VI-2. Politiques climatiques de précaution en présence d'incertitude sur la sensibilité du climat : évaluation à l'aide du modèle coût-bénéfice RESPONSE_Δ.

Le code du modèle est disponible en annexe.

Fonction objectif : maximisation de l'utilité inter-temporelle des générations successives

$$\text{Max}_{Ab_t^s} \sum_s p_s \sum_{t=1990}^{2300} N_t \ln \left(\frac{Y_t - f(Ab_t^s, Ab_{t-1}^s, t) - \Phi(\theta_{At}^s(t) - \theta_{At}(1990))}{N_t} \right) e^{-\eta(t-1990)}$$

Contrainte non anticipative

$$\forall t \leq t_{info}, \forall (s, s') \in S, Ab_t^s = Ab_t^{s'}$$

Emissions de référence de CO₂ (em_t)

données exogènes, tirées du scénario de référence (A1-m).

Cycle du carbone

$$\begin{pmatrix} A_{t+1}^s \\ B_{t+1}^s \\ O_{t+1}^s \end{pmatrix} = C_{trans} \cdot \begin{pmatrix} A_t^s \\ B_t^s \\ O_t^s \end{pmatrix} + \delta \cdot (1 - Ab_t^s) \cdot em_t \cdot \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}$$

Evolution de la température moyenne globale

$$\begin{bmatrix} \theta_{At}^s(t+1) \\ \theta_{Oc}^s(t+1) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 - \sigma_1(\lambda^s + \sigma_2) & \sigma_1\sigma_2 \\ \sigma_3 & 1 - \sigma_3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \theta_{At}^s(t) \\ \theta_{Oc}^s(t) \end{bmatrix} + \sigma_t \begin{bmatrix} F_{2x} \log(A_t^s / A_{Pl}) / \log 2 \\ 0 \end{bmatrix}$$

Le planificateur central cherche à résoudre un jeu de trois problèmes parallèles, correspondant à chaque état du monde (notamment, l'évolution de la température moyenne globale - via le paramètre λ - dépend de la valeur de la sensibilité du climat). Ces trois problèmes, pondérés par leur probabilité subjective d'occurrence, sont pris en compte dans la fonction objectif. Avant l'arrivée d'information, on impose que le niveau d'abattement soit identique quel que soit l'état du monde ; après l'arrivée d'information, ces niveaux peuvent se différencier selon les configurations propres à chaque état du monde.

Toutes les autres spécifications du modèle (scénario socio-économique de référence, forme des coûts d'abattement, modélisation de la chaîne causale qui va des émissions de GES au changement climatique - cycle du carbone et module d'évolution de la température -, conditions initiales, horizon du modèle, pas de temps, langage de programmation) sont communes à la famille *RESPONSE* et ont été présentées aux chapitres précédents.

Examinons d'abord le comportement du modèle quand la fonction de dommage est quadratique (Figure VI-7). On peut constater qu'en univers certain (voir courbes pointillé gris clair), les trajectoires d'émissions ne sont pas extrêmement différentes selon la valeur de la sensibilité du climat : en 2010, par exemple, les efforts d'abattement représentent de 16 à 24% des émissions de référence et en 2040, de 32 à 47%. L'incertitude sur la sensibilité du climat n'est donc pas aussi déterminante ici qu'elle ne l'était par exemple aux chapitres précédents (analyse coût-efficacité, notamment).

Intéressons-nous à la politique climatique sans arrivée d'information (courbe trait plein noir). Pour une croyance centrée, la trajectoire optimale d'émissions est presque confondue avec la trajectoire optimale obtenue pour le cas central certain (sensibilité du climat valant $+3,5^{\circ}\text{C}$). Pour des croyances extrêmes sur la sensibilité du climat, elle en reste relativement proche, tout en impliquant davantage d'efforts, s'il s'agit d'une croyance pessimiste, ou moins d'efforts, s'il s'agit d'une croyance optimiste. Comme pour une analyse coût-bénéfice avec 'Préférence pour la stabilité du climat' (voir chapitre V, § III.1), on peut ainsi constater qu'il n'y pas d'attraction par le pire des cas certains (sensibilité du climat à $4,5^{\circ}\text{C}$ impliquant de fournir davantage d'efforts car on se déplace plus rapidement au long de la fonction de dommages) à l'inverse de ce que l'on observe pour une analyse coût-efficacité. Dans un cadre coût-bénéfice avec des fonctions de dommages régulières (ici, quadratiques), le regret environnemental (celui d'être exposé à des dommages finalement importants car la sensibilité du climat prend une valeur élevée) n'exerce donc pas de pression disproportionnée, en dominant le regret économique (celui d'avoir engagé trop de dépenses d'abattement) - voire ce dernier peut lui être supérieur. Les éléments d'explication en sont les mêmes qu'au chapitre V (§ III.1). A la différence d'une analyse coût-efficacité, on valorise explicitement les bénéfices retirés d'un certain niveau d'efforts de réduction des émissions (les dommages évités) et on y autorise l'arbitrage entre dommages évités et coûts des efforts correspondants. L'équilibre entre les deux regrets peut donc pleinement s'exercer et pour des fonctions de dommages régulières, on peut se rendre compte qu'ils sont d'un ordre de grandeur comparable (la trajectoire optimale d'émissions pour une politique en boucle fermée reste proche du cas central certain) et que les croyances du planificateur central sur la sensibilité du climat sont déterminantes sur ce point (et beaucoup plus que pour une analyse coût-bénéfice avec 'Préférence pour la stabilité du climat').

Si l'on examine maintenant les trajectoires avec arrivée d'information (voir la Figure VI-8, dans le cas d'une croyance centrée), on peut constater qu'avant la date de résolution des incertitudes ces trajectoires sont presque confondues avec la trajectoire optimale en incertitude complète et ceci que l'information soit disponible en 2020 ou en 2040. Quelles que soient les croyances, ce

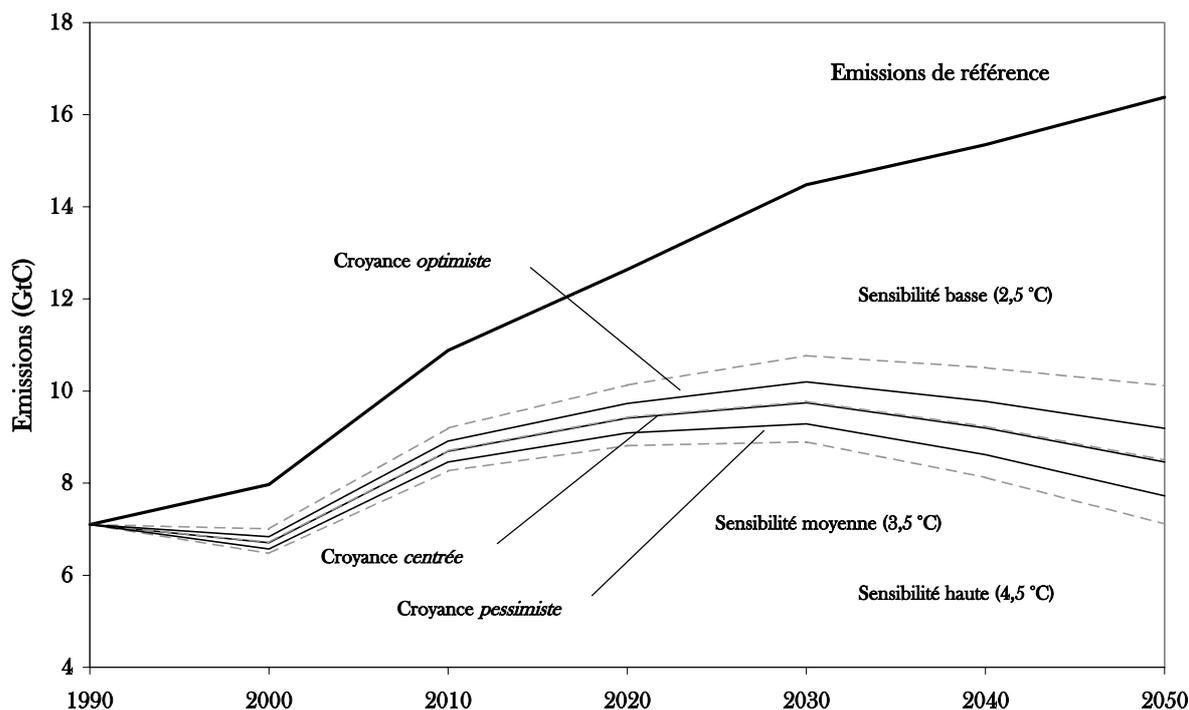


Figure VI-7. Politique climatique optimale en présence d'incertitude sur la sensibilité du climat (dommages quadratiques, pas d'apprentissage).

Trajectoires d'émissions dans un cadre coût-bénéfice pour une fonction de dommages quadratique avec incertitude sur la sensibilité du climat (aucune arrivée d'information). En pointillé gris clair, trajectoires en information parfaite.

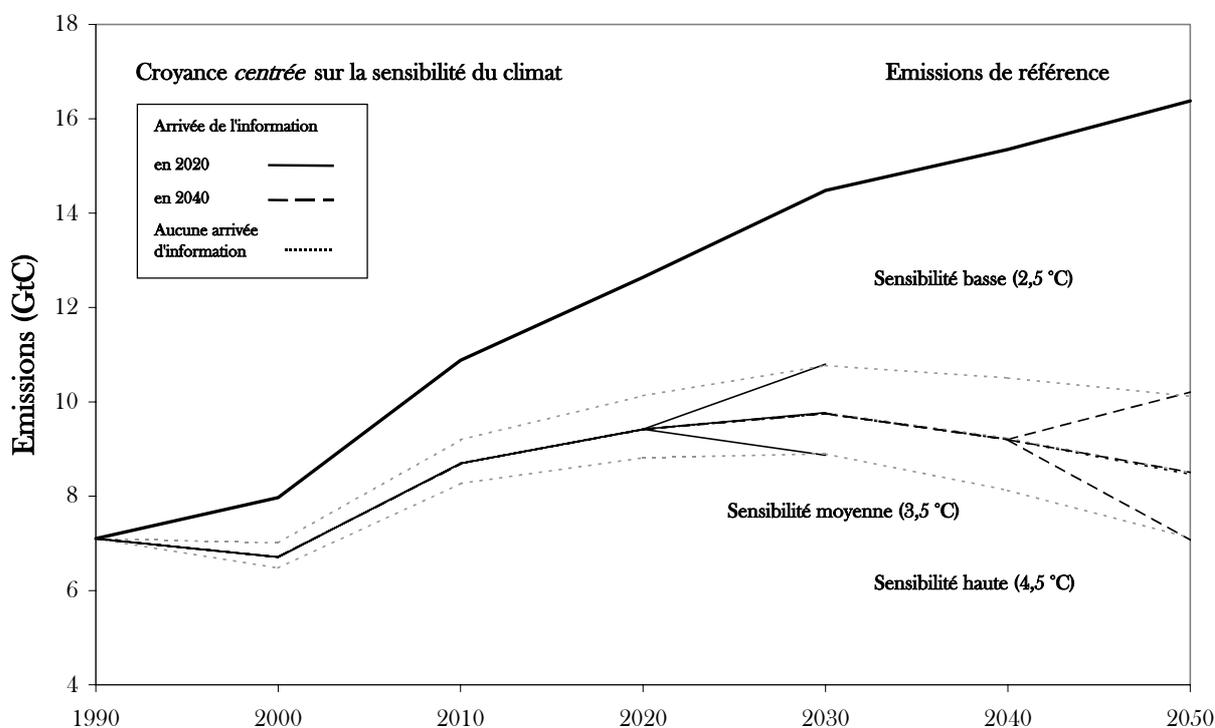


Figure VI-8. Politique climatique optimale en présence d'incertitude sur la sensibilité du climat (dommages quadratiques, avec arrivée d'information).

Trajectoires d'émissions dans un cadre coût-bénéfice pour une fonction de dommages quadratique avec incertitude sur la sensibilité du climat. En pointillé gris clair, trajectoires en information parfaite.

résultat est conservé (non montré ici). Ainsi, savoir (ou espérer) que l'on connaîtra la valeur avérée de la sensibilité du climat à une certaine date n'a pas d'influence sur la décision optimale avant cette date : on n'observe pas de flexibilité associée au processus d'acquisition future de l'information pour la décision avant la résolution des incertitudes. L'apprentissage n'est donc pas un élément déterminant du processus de décision à court-terme : on vient de voir que les deux regrets restaient d'un même ordre de grandeur. Il reste bien sûr toujours souhaitable de réduire les incertitudes pour éviter les regrets liés au fait que les politiques climatiques ne peuvent pas être ajustées aux états du monde mais on a vu que ces regrets restent finalement d'une amplitude faible.

Les résultats sont différents pour des trajectoires de dommages comportant des seuils (Figure VI-9). On peut remarquer qu'en univers certain (voir courbes pointillé gris clair), les trajectoires d'émissions sont beaucoup plus différenciées que précédemment selon la valeur de la sensibilité du climat : en 2010, par exemple, les efforts d'abattement représentent de 11 à 22 % des émissions de référence (soit du simple au double) et en 2040, de 21 à 55 % (plus d'un facteur 2, donc). L'incertitude sur ce paramètre est donc plus importante que dans l'éventualité de dommages quadratiques.

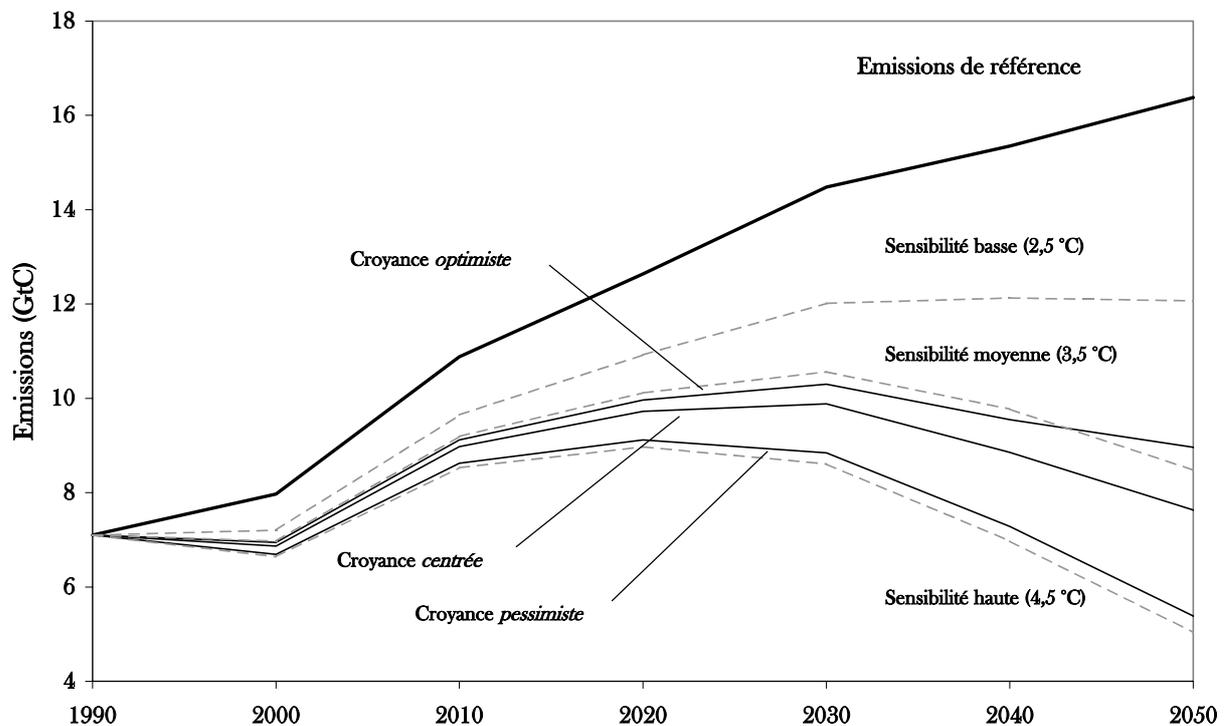


Figure VI-9. Politique climatique optimale en présence d'incertitude sur la sensibilité du climat (dommages à seuil, pas d'apprentissage).

Trajectoires d'émissions obtenues dans un cadre coût-bénéfice avec une fonction de dommages à seuil en présence d'incertitude sur la sensibilité du climat (aucune arrivée d'information). On a rajouté les trajectoires en information parfaite (courbes pointillé gris clair).

Dans cette configuration, l'incertitude sur la sensibilité du climat se traduit par une incertitude sur la date de rencontre du seuil (voir Figure VI-10) : plus elle est élevée, plus on entre tôt (dès 2040, pour le scénario de référence quand la sensibilité du climat vaut +4,5°C) dans l'intervalle de transition catastrophique. Plus la sensibilité du climat est élevée, plus on entreprend donc d'efforts de réduction des émissions importants et précoces pour éviter de rencontrer le seuil de danger : dans tous les cas, les trajectoires optimales d'émissions en univers certain présentées à

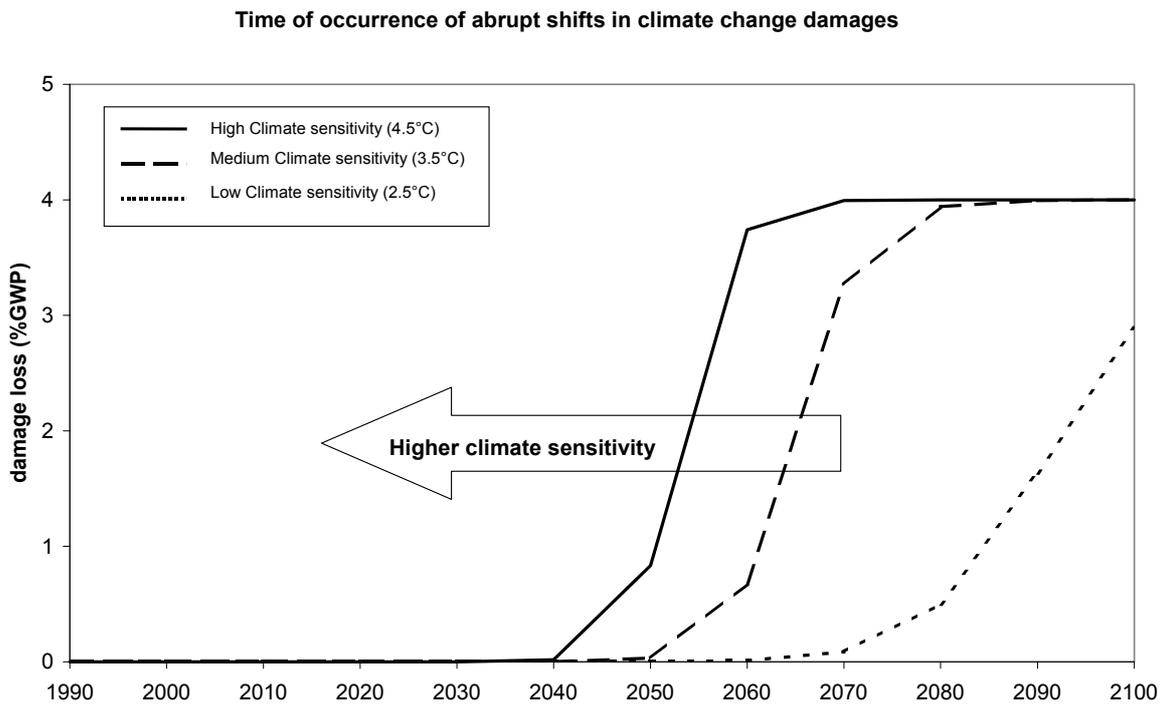
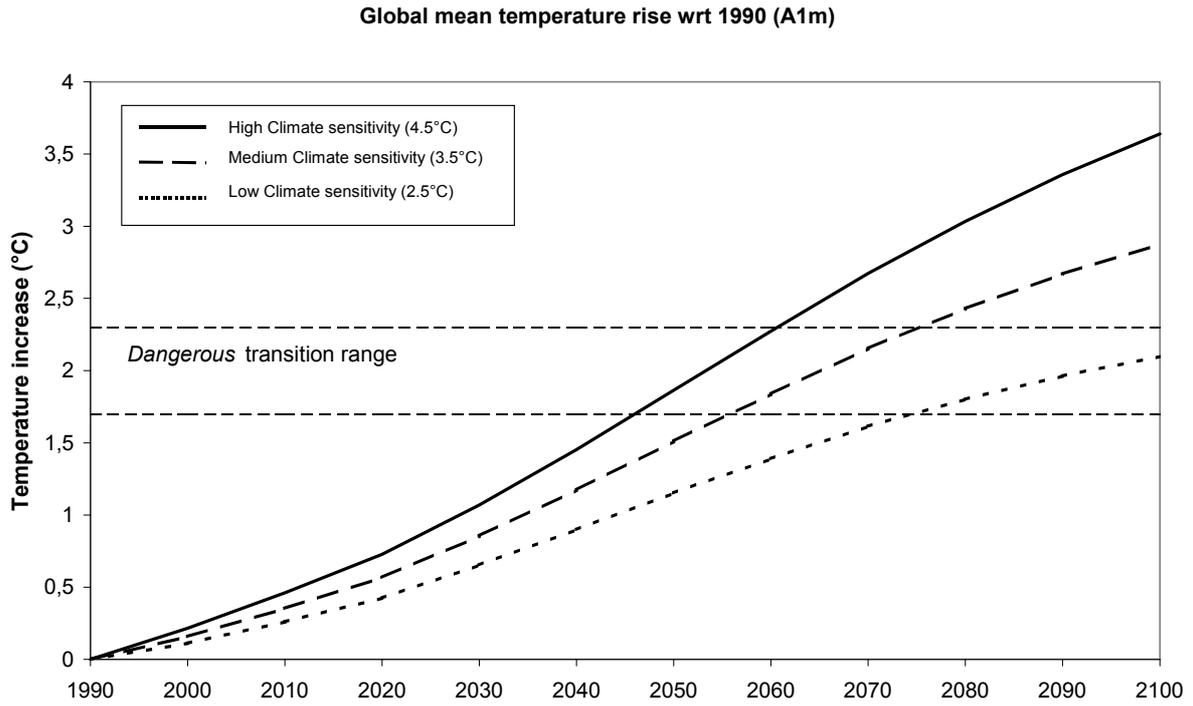


Figure VI-10. Incertitude sur la sensibilité du climat et rencontre des seuils de danger dans les dommages.

Selon la valeur de la sensibilité du climat, dans l'hypothèse d'un seuil de danger proche de +2°C, l'occurrence de phases d'accélération dans les dommages se produit de plus en plus tôt, plus la sensibilité du climat est élevée.

la Figure VI-9 permettent de limiter l'amplitude du réchauffement à des valeurs inférieures à +1,8°C (atteinte en 2080 quand la sensibilité du climat vaut +4,5°C).

Intéressons-nous d'abord à la politique climatique en incertitude complète (courbe trait plein noir) : pour une croyance centrée, la trajectoire optimale d'émissions reste proche de la trajectoire optimale du cas central certain (sensibilité du climat valant +3,5°C), en impliquant davantage d'efforts. Pour des croyances pessimistes sur la sensibilité du climat, elle est en revanche presque confondue avec le pire des cas certains (sensibilité du climat égale à +4,5°C). A l'inverse, pour des croyances optimistes, elle reste proche du cas central certain : elle implique davantage d'efforts à court- et moyen-terme (jusqu'en 2050) puis moins d'efforts à long-terme. Ainsi - et c'est une autre différence avec les résultats obtenus pour des fonctions de dommages quadratiques, la trajectoire d'émission en incertitude complète implique systématiquement à court-terme des efforts de réduction des émissions toujours plus importants qu'ils ne le sont dans le cas central certain, voire très stricts dans l'éventualité d'hypothèses *ex ante* pessimistes sur la valeur de la sensibilité du climat. Pour une croyance pessimiste, ces efforts permettent quelle que soit la valeur que prendra finalement la sensibilité du climat, de ne jamais s'approcher de l'intervalle de transition catastrophique. Pour les croyances centrée et optimiste, les efforts permettent, de même, de ne jamais s'en approcher si la sensibilité du climat vaut finalement +2,5°C ou +3,5°C ; en revanche si elle vaut +4,5°C, les efforts retardent ce moment de seulement quelques décennies : de 2040, dans le scénario de référence, il passe à 2070-2080.

Examinons maintenant les trajectoires optimales d'émissions avec arrivée d'information (Figure VI-11). Selon la date à laquelle on peut espérer que soit révélée la vraie valeur de la sensibilité du climat, la trajectoire optimale d'efforts avant l'arrivée d'information oscille autour de la trajectoire optimale d'abattement en incertitude complète : si l'information parvient assez tôt (avant 2040), le niveau d'effort avec apprentissage est moins important que dans une situation où il n'y a pas d'apprentissage; si l'information est obtenue plus tard, c'est l'inverse. L'effet de l'apprentissage traduit une plus grande flexibilité pour la politique optimale grâce à l'information que l'on espère acquérir. En effet, on doit se rappeler que 2040 est une date critique car c'est le moment où on commence à pénétrer dans l'intervalle de transition catastrophique si la sensibilité du climat vaut +4,5°C (voir Figure VI-10). A partir de ce moment, le dommage croît extrêmement rapidement dans le temps : de 4% en l'espace de 20 ans, soit une génération, ce qui correspond - dans l'hypothèse d'une croissance soutenue à 2% l'an - à un ralentissement de la croissance à 1,86%. Pour éviter ce choc particulièrement défavorable ou en limiter l'ampleur, on propose donc dès aujourd'hui des trajectoires d'émissions de plus en plus contraintes moins on a d'espoir d'obtenir des informations sur la valeur de la sensibilité du climat⁸. Vu d'aujourd'hui, l'information sur la sensibilité du climat est donc particulièrement précieuse dans ce contexte, en particulier si elle arrive avant 2040.

C'est ce qu'on peut constater Figure VI-12 : dans l'éventualité de dommages à seuil, la valeur de l'information sur la sensibilité du climat passe en quelques années, de 2030 à 2070, d'un peu plus de 15% à plus de 80% de sa valeur à l'infini (quelle que soit la croyance du planificateur). En revanche, sa croissance est régulière quand les dommages sont quadratiques du fait, nous

⁸ Si l'information arrive en 2020, on a encore assez de marge de manœuvre (pour éviter de s'approcher du seuil si la sensibilité du climat est élevée) pour limiter les efforts avant cette date. Si l'information arrive plus tard en revanche, on cherche à éviter une telle situation en entreprenant plus d'efforts. Si l'information n'arrive jamais, on fait un pari, qui implique ici une trajectoire d'émissions (que l'on ne peut pas réviser) un peu moins stricte que dans le cas avec apprentissage vers 2030-2060.

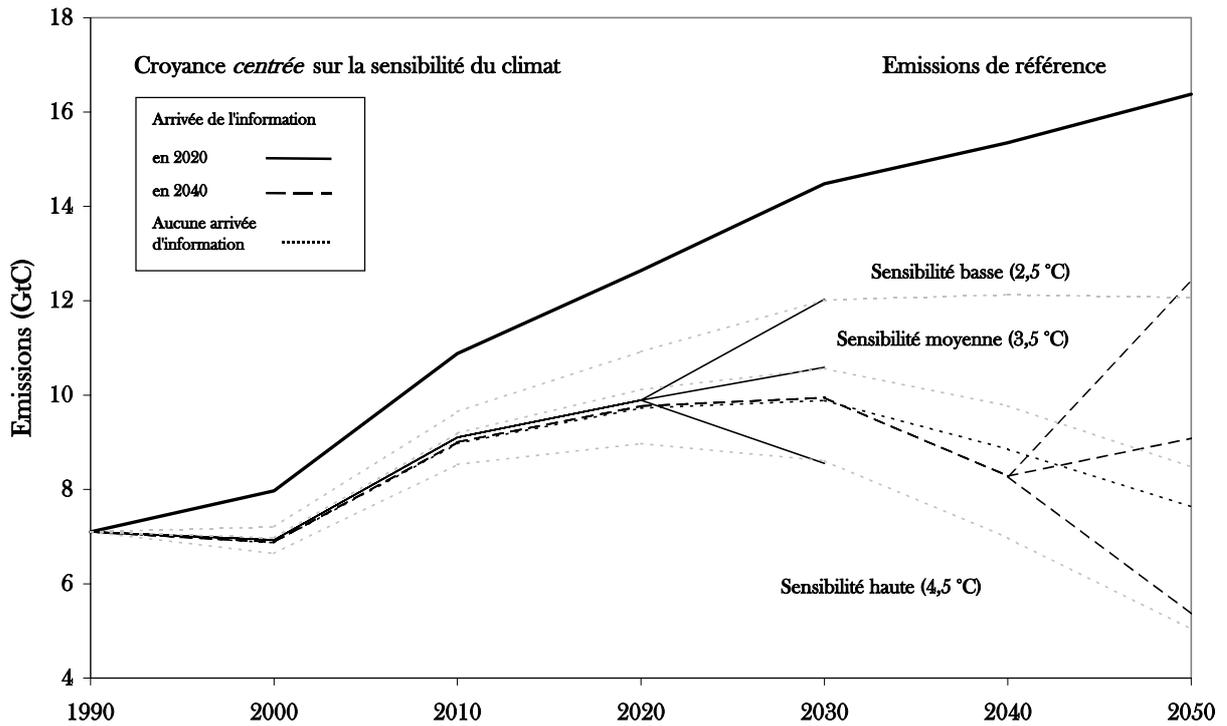


Figure VI-11. Politique climatique optimale en présence d'incertitude sur la sensibilité du climat (dommages à seuil, avec arrivée d'information).

Trajectoires d'émissions obtenues dans un cadre coût-bénéfice avec une fonction de dommages à seuil en présence d'incertitude sur la sensibilité du climat. En pointillé gris clair, les trajectoires en information parfaite.

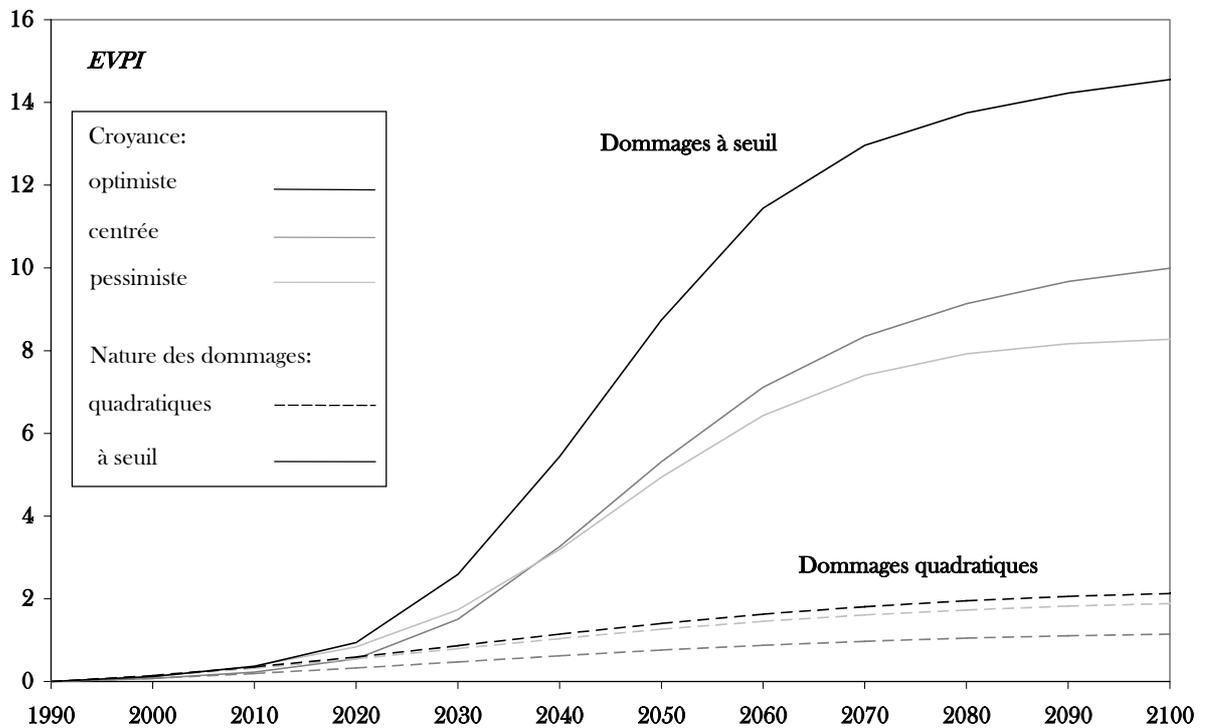


Figure VI-12. Valeur de l'information sur la sensibilité du climat en fonction de sa date d'arrivée pour des dommages quadratiques et à seuil.

l'avons vu, du caractère peu déterminant de l'apprentissage sur la décision optimale. On peut également remarquer que la valeur de l'information sur la sensibilité du climat quand les dommages sont quadratiques est nettement moins importante (moins du tiers, dès 2030-2040) que lorsqu'il existe des seuils dans les dommages. Ce second cas de figure en effet exerce une forte pression sur la politique de précaution : pour éviter de se retrouver dans une situation défavorable ou au moins pour en retarder l'échéance, on entreprend beaucoup d'efforts avec potentiellement un regret économique important (on se rappelle que les trajectoires optimales d'émissions en certain sont bien différenciées Figure VI-9). Ce qui n'est pas le cas pour des dommages de type quadratiques où le regret net de ne pas disposer de l'information est plus faible. On retrouve là un des résultats établis par [Peck et Teisberg, 1993b] : la valeur de l'information sur la sensibilité du climat est d'autant plus importante que les fonctions de dommages sont convexes. Leur étude est limitée à des fonctions de type puissance (exposant valant successivement 1, 2 ou 3) et ils établissent que la ratio des valeurs de l'information (à 100 ans) entre dommages cubiques et quadratiques vaut 7,6. Ici, ce même rapport quand on prend en compte l'éventualité de seuils dans les dommages passe à 8,7 (pour une croyance centrée).

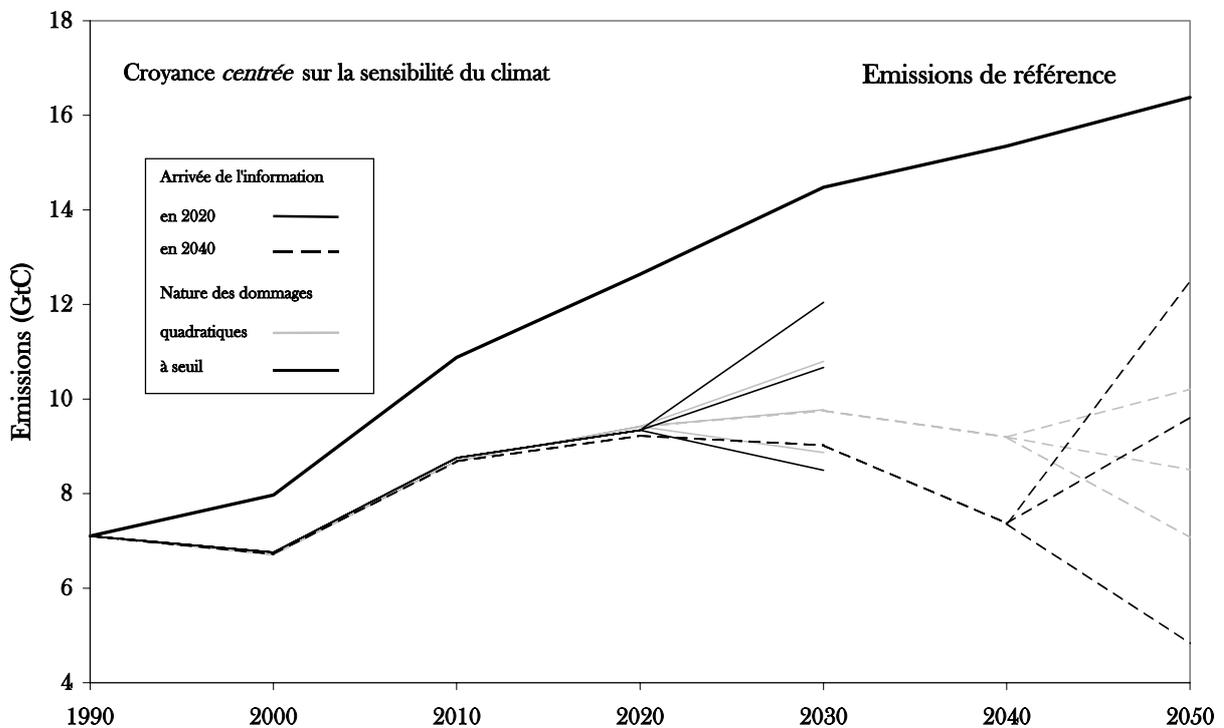


Figure VI-13. Politique climatique optimale pour des dommages quadratiques ou à seuil en présence d'incertitude sur la sensibilité du climat.

Comparons maintenant les trajectoires optimales d'émissions avec arrivée d'information sur la sensibilité du climat pour les deux configurations des dommages (Figure VI-13). Si l'information arrive après 2030, une situation où les dommages comportent des seuils implique davantage d'efforts de réduction des émissions à court-terme. On a vu que ceci s'expliquait par l'existence d'un intervalle de transition catastrophique - avec un choc significatif sur la production et la croissance que l'on cherchait à éviter, ce qui ne se produit pas dans une configuration où les dommages sont quadratiques (jusqu'en 2050, ils croissent au maximum de 1% du revenu par décennie dans l'hypothèse où la sensibilité du climat est la plus élevée). Dans

l'éventualité où de tels seuils pourraient être identifiés (et nous avons vu qu'il en existait beaucoup en puissance), ceci confirme l'existence d'une fenêtre d'opportunité pour une action précoce, compte tenu des incertitudes encore nombreuses (et semble-t-il durables) sur la dynamique du climat.

III.2. Politiques de précaution et croyance sur les risques climatiques

Nous venons d'évaluer l'importance de l'incertitude sur la dynamique du climat dans le cadre d'une analyse coût-bénéfice des politiques climatiques, en la mettant en rapport avec la nature des risques du changement climatique (croissance régulière des dommages ou phases d'accélération imputables à la rencontre de seuils de vulnérabilité). Examinons à présent quelle stratégie de précaution est proposée en présence de croyances sur les risques climatiques.

Pour cette exploration numérique, nous considérons deux fonctions de dommages, calibrées autour du même point arbitraire : une perte du revenu global de 1% pour une élévation de la température moyenne globale de +2°C. Dans le premier cas, nous retenons une fonction puissance, quadratique, qui s'écrit :

$$\Phi(\Delta\theta) = \alpha (\Delta\theta)^2 Y$$

- où $\Delta\theta$ désigne l'amplitude du changement climatique en cours, mesurée de manière synthétique par la variation de la température moyenne globale,
 α coefficient d'échelle, indiquant quelle fraction du revenu est perdue sous l'effet d'un changement climatique d'amplitude $\Delta\theta$ ($\alpha = 0,25 \text{ \% } ^\circ\text{C}^{-2}$),
 Y le niveau de revenu.

Dans le second cas, la fonction de dommage s'écrit comme la somme de deux termes : une fonction logistique pour représenter l'existence d'un seuil de vulnérabilité (avec un intervalle de transition catastrophique allant de $Z = +1,7^\circ\text{C}$ à $K = +2,3^\circ\text{C}$) et une fonction linéaire, que l'on ajoute pour que dans les deux cas envisagés, les profils de dommages dans le scénario de référence soient à peu près similaires au moins jusqu'en 2050 (voir Figure VI-14).

$$\Phi(\Delta\theta) = \frac{d}{1 + \left(\frac{2-e}{e}\right)^{\frac{K+Z-2\Delta\theta}{K-Z}}} Y + \beta (\Delta\theta) Y$$

- où d plafond de la composante logistique de la fonction de dommages ($d = 3\%$),
 β coefficient d'échelle de la composante linéaire de la fonction de dommages, indiquant quelle fraction du revenu est perdue sous l'effet d'un changement climatique d'amplitude $\Delta\theta$ ($\beta = 0,5 \text{ \% } \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$).

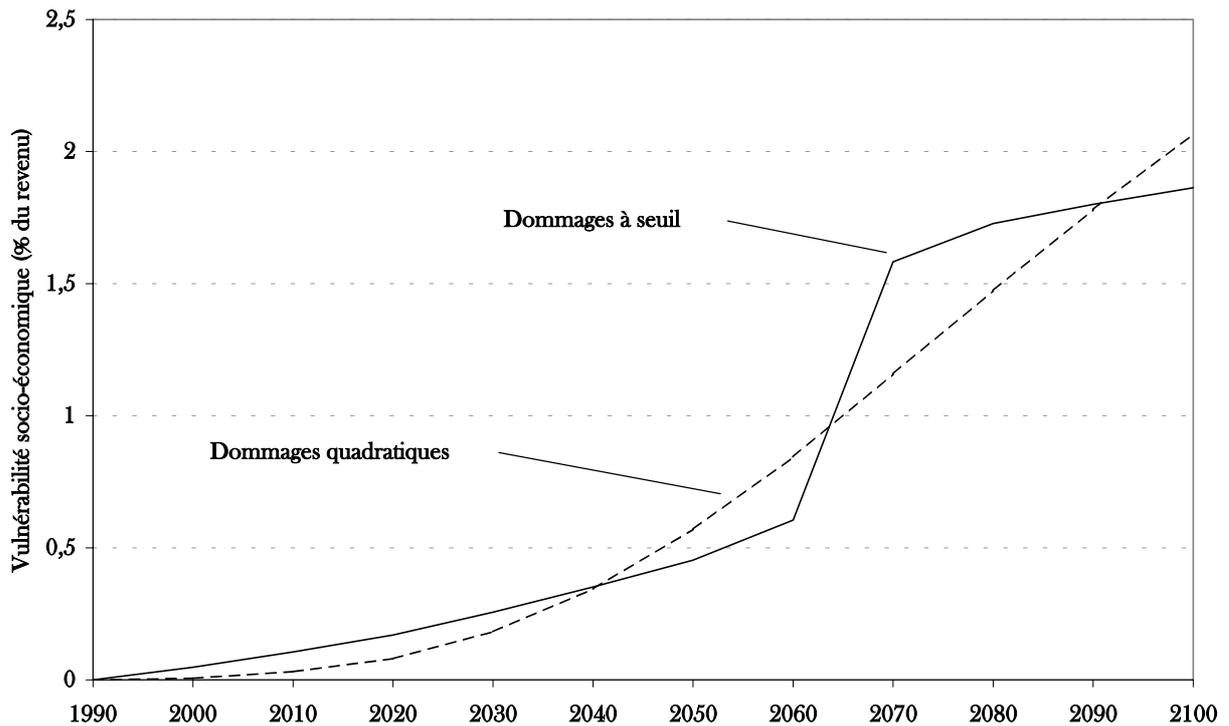


Figure VI-14. Profils des dommages du modèle *RESPONSE_Δ* (sensibilité du climat = +3,5°C).

A partir de ces spécifications fonctionnelles à propos des dommages, nous reformulons le modèle *RESPONSE_Δ* de la manière suivante (voir Encadré VI-3). L'incertitude cette fois porte sur la forme des fonctions de dommages et on considère deux états du monde (indiqués *s*) : soit les fonctions de dommages sont quadratiques (*Q*), soit ce sont des fonctions à seuil (*S*). Pour rendre compte de la diversité des croyances des modélisateurs sur ce point, nous considérons les quatre distributions de probabilités *ex ante* suivante : $\{p_Q = 1 ; p_S = 0\}$ (quadratique en certain), $\{p_Q = 0,95 ; p_S = 0,05\}$, $\{p_Q = 0,5 ; p_S = 0,5\}$ et $\{p_Q = 0 ; p_S = 1\}$ (fonction à seuil en certain). Comme précédemment, un processus d'apprentissage se produit (et compte tenu des formes des fonctions de dommages retenues, il n'est pas exclu que l'on ne puisse pas discriminer leur nature avant 2050). Nous considérons que l'incertitude peut être levée au début de chaque décennie du siècle (t_{info} compris entre 2000 et 2100), en incluant deux cas polaires, information parfaite ($t_{info} = 1990$) et incertitude complète ($t_{info} = 2300$, l'horizon du modèle).

L'objectif du planificateur central est de maximiser l'espérance sur les deux états du monde de l'utilité inter-temporelle des générations successives, dont le bien-être dépend de la consommation *per capita* courante diminuée des coûts d'abattement et des dommages résiduels. Pour cette section, η , la préférence pure pour le présent est fixée à 3 %. an^{-1} et la sensibilité du climat à sa valeur centrale, +3,5°C. On cherche à résoudre un jeu de deux problèmes parallèles, chacun indicé par l'état du monde auquel il correspond. Ces deux problèmes, pondérés par leur probabilité subjective d'occurrence, sont considérés par le planificateur central dans la fonction objectif. Avant l'arrivée d'information, on impose que le niveau d'abattement soit identique quel que soit l'état du monde ; après l'arrivée d'information, ces niveaux peuvent se différencier selon les configurations propres à chaque état du monde.

Encadré VI-3. Politiques climatiques de précaution en présence d'incertitude sur la forme des fonctions de dommages : évaluation à l'aide du modèle coût-bénéfice RESPONSE_Δ.

Le code du modèle est disponible en annexe.

Fonction objectif : maximisation de l'utilité inter-temporelle des générations successives

$$\text{Max}_{Ab_t^s} \sum_s p_s \sum_{t=1990}^{2300} N_t \ln \left(\frac{Y_t - f(Ab_t^s, Ab_{t-1}^s, t) - \Phi^s(\theta_{At}^s(t) - \theta_{At}(1990))}{N_t} \right) e^{-\eta(t-1990)}$$

Contrainte non anticipative

$$\forall t \leq t_{info}, \forall (s, s') \in \{P, Q\}, Ab_t^s = Ab_t^{s'}$$

Emissions de référence de CO₂ (em_t)

données exogènes, tirées du scénario de référence (A1-m).

Cycle du carbone

$$\begin{pmatrix} A_{t+1}^s \\ B_{t+1}^s \\ O_{t+1}^s \end{pmatrix} = C_{trans} \cdot \begin{pmatrix} A_t^s \\ B_t^s \\ O_t^s \end{pmatrix} + \delta \cdot (1 - Ab_t^s) \cdot em_t \cdot \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}$$

Evolution de la température moyenne globale

$$\begin{bmatrix} \theta_{At}^s(t+1) \\ \theta_{Oc}^s(t+1) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 - \sigma_1(\lambda + \sigma_2) & \sigma_1\sigma_2 \\ \sigma_3 & 1 - \sigma_3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \theta_{At}^s(t) \\ \theta_{Oc}^s(t) \end{bmatrix} + \sigma_t \begin{bmatrix} F_{2x} \log(A_t^s / A_{Pl}) / \log 2 \\ 0 \end{bmatrix}$$

Les résultats sont présentés Figure VI-15. On peut remarquer qu'en univers certain (suivre les courbes en trait plein noir) les niveaux d'abattement des émissions de référence (au-delà de 2030) sont plus élevés quand les dommages sont décrits au moyen de fonctions à seuil : ces efforts s'élèvent respectivement en 2050, à 41% des émissions de référence (contre 33% pour des dommages quadratiques) et en 2070, à 60% (45% pour des dommages quadratiques).

Qu'en est-il maintenant en présence d'incertitude ? On peut à nouveau remarquer que l'apprentissage n'est pas un élément déterminant du processus de décision : avant la date de résolution des incertitudes, les trajectoires optimales avec arrivée d'information (ici, en 2060 et 2080) sont presque confondues avec la trajectoire optimale en incertitude complète. On doit surtout constater l'influence des croyances sur les trajectoires optimales d'émissions et logiquement plus l'une des deux hypothèses reçoit de poids, plus la trajectoire optimale d'émissions sous incertitude se rapproche de la trajectoire en certain correspondante : pour des croyances équiprobables, la trajectoire optimale d'émissions en présence d'incertitude est maintenant très proche de la trajectoire en certain correspondant aux dommages à seuil. Là encore, on observe une attraction par le pire des cas certains.

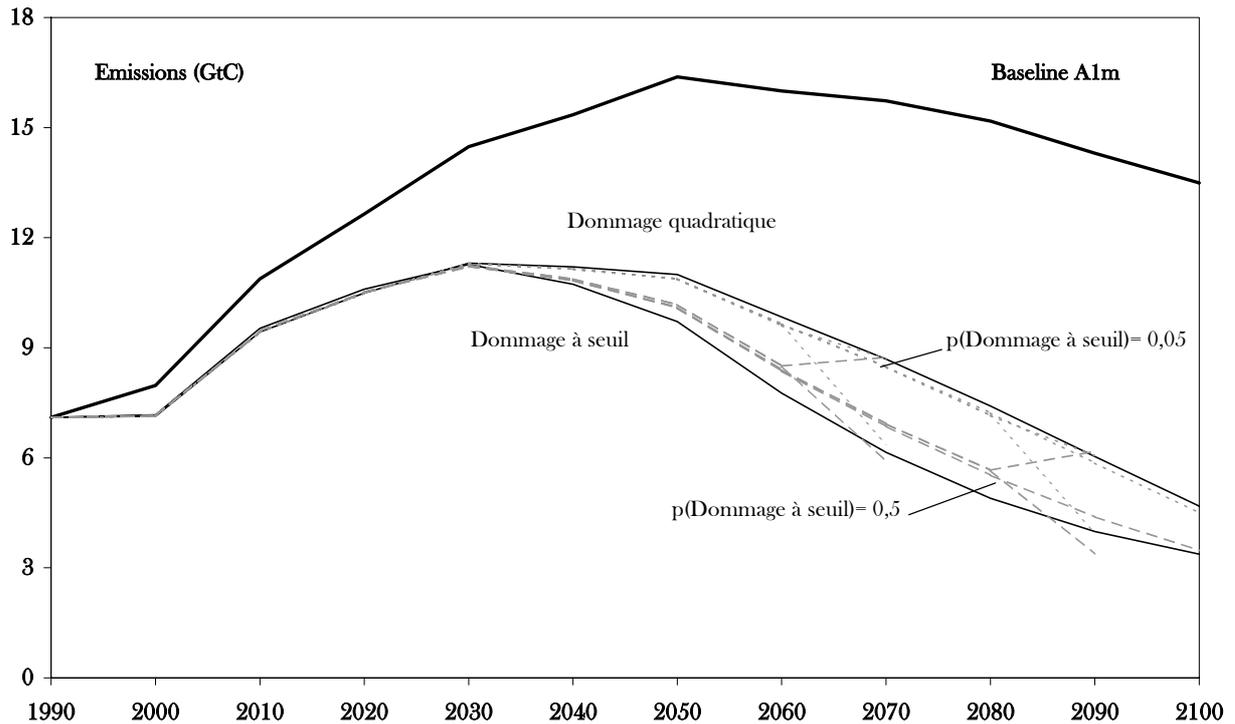


Figure VI-15. Politique climatique optimale en présence d'incertitude sur la forme de la fonction de dommages : quadratique ou à seuil.

En trait plein noir, les trajectoires en univers certain pour les dommages quadratiques (en haut) et à seuil (en bas). En gris clair, les trajectoires avec apprentissage (deux dates : 2040 et 2080) ou en incertitude complète, pour différentes croyances à propos de l'occurrence de dommages à seuil (en pointillé, 5% ; en tiret, 50%).

En conclusion, les résultats de nos simulations soulignent toute l'importance de potentielles phases d'accélération dans les dommages : la perspective d'une perte de revenu, même faible mais concentrée dans le temps, peut justifier des efforts de réduction des émissions importants. En retenant des trajectoires de dommages calibrées autour du même point et relativement comparables au cours du XXI^{ème} siècle - l'une d'entre elles présentant un seuil tandis que l'autre est une trajectoire régulière (nous avons testé ici l'hypothèse de fonction de dommages quadratiques), les profils optimaux d'émissions correspondant se différencient dès 2030, celle comportant un seuil conduisant à des niveaux d'abattement plus importants (et même si le niveau de dommages à long-terme est plus faible dans cette configuration). En présence d'incertitude, cet effet est renforcé, qu'il s'agisse d'une incertitude sur la sensibilité du climat qui détermine la date à laquelle peut s'amorcer une telle accélération des dommages ou qu'il s'agisse d'une incertitude sur la forme même de la fonction de dommages. Dans le premier cas, la valeur de l'information associée à la sensibilité du climat est élevée et il est particulièrement souhaitable d'acquérir cette information avant 2030-2040. Dans le second cas, on peut constater la forte pression qu'exerce l'éventualité de dommages à seuil sur la décision optimale.

Conclusion

Ce chapitre s'est ouvert sur le constat suivant : nous sommes loin de disposer d'une représentation aboutie des risques climatiques dans les modèles intégrés, en particulier en ce qui concerne la description d'un système en transition (avec de possible seuils défavorables) et l'image des risques de long-terme. Pour pallier nos connaissances encore très insuffisantes sur ce point, un certain nombre d'hypothèses sont introduites au moment d'écrire les fonctions de dommages. Or elles peuvent jouer le rôle d'une main invisible, en orientant les résultats des analyses coût-bénéfice. Parmi celles-ci, la forme de la fonction de dommages - qui dicte comment ils évoluent dès lors qu'on s'écarte du point de calibrage - joue un rôle central.

Nous avons pu l'évaluer à partir de simulations numériques menées avec le modèle *RESPONSE_Δ*, en comparant les recommandations pour l'action qu'il produit pour deux types de trajectoires de dommages : soit des trajectoires régulières (avec des fonctions de dommages quadratiques, ce qui est la pratique courante), soit des trajectoires présentant des seuils (avec des fonctions sigmoïdes).

Dans le premier cas, on retrouve comme pour les analyses coût-bénéfice avec 'Préférence pour la stabilité du climat' qu'en présence d'incertitude sur la sensibilité du climat, on n'observe pas d'attraction par le pire des cas certains. Les regrets économiques sont dès lors peu importants et l'effet de l'apprentissage sur la sensibilité du climat est peu déterminant pour la décision optimale : il n'y a donc pas spécialement de fenêtre d'opportunité pour apprendre la valeur de ce paramètre. Regret économique et regret environnemental sont en fait d'ampleur similaire et leur équilibre (à la différence des résultats pour les analyses coût-bénéfice avec 'Préférence pour la stabilité du climat') dépend étroitement des croyances du planificateur à propos de la valeur de la sensibilité du climat : s'il est pessimiste, le regret environnemental domine le regret économique ; c'est l'inverse s'il est optimiste.

Dans le second cas, on retrouve des résultats beaucoup plus proches qualitativement de ceux établis pour des analyses coût-efficacité et ceci souligne toute l'importance de prendre en compte de potentielles phases d'accélération dans les dommages (ce que ne peuvent pas représenter les fonctions de dommages couramment utilisées). L'éventualité d'une perte de revenu, même faible mais concentrée dans le temps, peut justifier des efforts de réduction des émissions importants. Cet effet est renforcé en présence d'incertitude, qu'il s'agisse d'une incertitude sur la sensibilité du climat qui détermine la date à laquelle peut s'amorcer une telle accélération des dommages ou qu'il s'agisse d'une incertitude sur la forme même de la fonction de dommages. Ces résultats invitent à orienter les efforts de recherche dans le sens d'une caractérisation des phénomènes qui pourraient enclencher de telles accélérations dans les dommages - et nous avons commencé à les pointer. Dans l'éventualité où de tels seuils pourraient être identifiés, ceci suggère l'existence d'une fenêtre d'opportunité pour une action précoce même sans faire l'hypothèse d'une catastrophe climatique et de dommages de long-terme significatifs, compte tenu des incertitudes encore nombreuses (et semble-t-il durables) sur la dynamique du climat.

Références bibliographiques

- Alley, R. (dir.) (2002). *Abrupt climate change: inevitable surprises*, National Academy Press, Washington DC.
- Ambrosi, P. et J.C. Hourcade (2003). Evaluer les dommages: une tâche impossible?, in *Les enjeux économiques de l'effet de serre*, R. Guesnerie (dir.), p 117-144, La Documentation Française, Paris.
- Ambrosi, P., J.C. Hourcade, S. Hallegatte, F. Lecocq, P. Dumas et M. Ha Duong (2003). Optimal control models and elicitation of attitudes towards climate damages, *Environmental Modeling and Assessment*, 8 (3), 133-147.
- Barnett, J. et N. Adger (2001). *Climate Dangers and Atoll Countries*, (WP n°9). Tyndall Centre, Norwich (UK).
- BMU (2002). *Climate Change and Conflict*, das Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU), Berlin (Germany).
- Bruce, J.P., H. Lee et E.F. Haites (dir.) (1996). *Climate change 1995: Economic and social dimensions of climate change. Contribution of Working Group III to the Second Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, Cambridge University Press, Cambridge (UK&US).
- Buddemeier, R.W., J.A. Kleypas et R.B. Aronson (2004). *Coral reefs & Global climate change: Potential Contributions of Climate Change to Stresses on Coral Reef Ecosystems*, 48 p, Pew Center on Global Climate Change, Washington D.C.
- Burke, L., D. Bryant, J.W. McManus et M. Spalding (1998). *Reefs at Risk: A map-based indicator of threats to the world's coral reefs*, World Resources Institute (WRI), ICLARM, WCMC, UNEP, Washington D.C.
- Deneux, M. (2002). *L'évaluation de l'ampleur des changements climatiques, de leurs causes et de leur impact prévisible sur la géographie de la France à l'horizon 2025, 2050 et 2100*, Rapport n° 3603 (Ass. Nationale n° 224 (Sénat), Office parlementaire d'évaluation des choix scientifiques et technologiques (Assemblée nationale, Sénat), Paris.
- Dowlatabadi, H. et M.G. Morgan (1993). A model framework for integrated assessment of the climate problem, *Energy Policy*, 21, 209-221.
- Dowlatabadi, H. et M.G. Morgan (1995). *Integrated climate Assessment Model 2.0: Technical discussion*. Department of Engineering and Public Policy, Carnegie Mellon University, Pittsburgh (PA).
- Dumas, P. et M. Ha Duong (2001). Non-linearities and uncertain climate impacts, Actes du colloque *Energy Modelling Forum (EMF)*, Laxenburg (Austria), 19-21 June 2001.
- Eyre, N., T. Downing, R. Hoekstra, K. Rennings et R.S.J. Tol (1999). *ExternE (Externalities of Energy): Global Warming Damages*, Contract JOS3-C95-0002, European Commission: DG XII (Science, Research and Development).
- FAO (2002). FAOSTAT, FAO, Rome (Italy).
- Farrow, S. (1998). Environmental equity and sustainability: rejecting the Hicks-Kaldor criteria, *Ecological Economics*, 27, 183-188.
- Haug, G.H., D. Günther, L.C. Peterson, D.M. Sigman, K.A. Hughen et B. Aeschlimann (2003). Climate and the collapse of Maya civilization, *Science*, 299 (5613 (14 Mar.)), 1731-1735.
- Heal, G.M. (2001). *Intertemporal Welfare Economics and the Environment*. Columbia Business School, Columbia University, New York.
- Hoegh-Guldberg, O., H. Hoegh-Guldberg, D.K. Stout, H. Cesar et A. Timmerman (2000). *Pacific in Peril: Biological, Economic and Social Impacts of Climate change on Pacific coral Reefs*, 71 p, Greenpeace.

- Hope, C., J. Anderson et P. Wenman (1993). Policy Analysis of the Greenhouse Effect: An Application of the PAGE Model, *Energy Policy*, 21 (3), 327-338.
- Hope, C. et P. Maul (1996). Valuing the impact of CO₂ emissions, *Energy Policy*, 24 (3), 211-219.
- Kelly, D. et C.D. Kolstad (1999). Integrated assessment models for climate change control, in *Yearbook of environmental and resource economics 1999/2000*, Folmer et Tietenberg (dir.), p 171-197.
- Lecocq, F. (2000). *Distribution spatiale et temporelle des coûts des politiques publiques sous incertitudes: théorie et pratique dans le cas de l'effet de serre*, Thèse de Doctorat, Sciences de l'environnement, Ecole Nationale du Génie Rural, des Eaux et Forêts (ENGREF), Paris.
- Lecocq, F. et J.C. Hourcade (2003). Incertitude, irréversibilités et actualisation dans les calculs économiques sur l'effet de serre, in *Les enjeux économiques de l'effet de serre*, R. Guesnerie (dir.), p 177-199, La Documentation Française, Paris.
- Manne, A.S., R. Mendelsohn et R. Richels (1995). MERGE - A Model for Evaluating Regional and Global Effects of GHG Reduction Policies, *Energy Policy*, 23 (1), 17-34.
- Manne, A.S. et R. Richels (1995). The Greenhouse Debate: Economic Efficiency, Burden Sharing and Hedging Strategies, *Energy Journal*, 16 (4), 1-37.
- Manne, A.S. et R. Richels (1999). The Kyoto Protocol: a cost-effective strategy for meeting environmental objectives?, *The Energy Journal, Kyoto Special Issue*, 1-25.
- McCarthy, J.J., O.F. Canziani, N.A. Leary, D.J. Dokken et K.S. White (dir.) (2001). *Climate Change 2001: Impacts, adaptation and vulnerability. Contribution of Working Group II to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, Cambridge University Press, Cambridge (UK & US).
- Mendelsohn, R., W. Morrison, M.E. Schlesinger et N.G. Andronova (1997). *Country-Specific Market Impacts of Climate Change*, crga.atmos.uiuc.edu/publications/market_impacts/text.html.
- Mendelsohn, R., W. Morrison, M.E. Schlesinger et N.G. Andronova (2000). Country-Specific Market Impacts of Climate Change, *Climatic Change*, 45, 553-569.
- Mendelsohn, R., W. Nordhaus et D. Shaw (1994). The Impact of Global Warming on Agriculture: A Ricardian Analysis, *The American Economic Review*, 84 (4), 753-771.
- Nordhaus, W. (1993a). Optimal Greenhouse-Gas Reductions and Tax Policy in the "DICE" Model, *American Economic Review*, 83, 313-317.
- Nordhaus, W. (1993b). Rolling the 'DICE': An Optimal Transition Path for Controlling Greenhouse Gases, *Resource and Energy Economics*, 15, 27-50.
- Nordhaus, W. (1994). *Managing the Global Commons: the Economics of Climate Change*, MIT Press, Cambridge(MA, USA).
- Nordhaus, W. et J.G. Boyer (1999). Requiem for Kyoto: An Economic Analysis of the Kyoto Protocol, *The Energy Journal*, 20 (Special Issue: The Costs of the Kyoto Protocol), 93-130.
- Nordhaus, W. et J.G. Boyer (2000). *Warming the world: Economics models of Climate Change*, 246 p, MIT Press, Cambridge (MA, USA).
- Palmer, T.N. et J. Räisänen (2002). Quantifying the risk of extreme seasonal precipitation events in a changing climate, *Nature*, 415 (31 jan. 2002), 512-514.
- Peck, S. et T. Teisberg (1993a). Global warming uncertainties and the value of information: an analysis using CETA, *Resources and Energy Economics*, 15 (1), 71-97.

- Peck, S. et T. Teisberg (1993b). The importance of nonlinearities in global warming damage costs, Actes du colloque *Assessing surprises and nonlinearities in greenhouse warming*, J. Darmstadter et M.A. Toman (org.), RFF, Washington D.C., May 1993.
- Peck, S.C. et J.T. Teisberg (1994). Optimal carbon emissions trajectories when damages depend on the rate or level of global warming, *Climatic Change*, 28, 289-314.
- Plambeck, E.L. et C. Hope (1996). PAGE95: an updated valuation of the impacts of global warming, *Energy Policy*, 24 (9), 783-793.
- Plambeck, E.L., C. Hope et J. Anderson (1997). The PAGE95 model: integrating the science and economics of global warming, *Energy Economics*, 19, 77-101.
- Portney, P.R. et J. Weyant (dir.) (1999). *Discounting and Intergenerational Equity*, 202 p, RFF, Washington D.C.
- Rahmstorf, S. (2002). Ocean circulation and climate during the past 120,000 years, *Nature*, 419 (12 September 2002), 207-214.
- Sandweiss, D.H., K.A. Maasch, R.L. Burger, J.B.I. Richardson III, H.B. Rollins et A. Clement (2001). Variation in Holocene El Niño frequencies: Climate records and cultural consequences in ancient Peru, *Geology*, 29 (7), 603-606.
- Simonett, O. (1989). *Potential impacts of global warming: cases studies on climatic change*, GRID-Geneva, Geneva (Switzerland).
- Smith, J.B. et S. Hitz (2002). *Estimating global impacts from climate change: Background paper for the OECD/WPGSP project "Benefits of climate policy"*, 94 p, Stratus Consulting Inc., Boulder (CO).
- Spalding, M.D., C. Ravilious et E.P. Green (2002). *World Atlas of Coral Reefs*, 424 p, University of California Press, Berkeley (CA).
- Spash, C.L. (1994). Double CO₂ and beyond: benefits, costs and compensation, *Ecological Economics*, 10, 27-36.
- Tol, R.S.J. (1996). The damage costs of climate change towards a dynamic representation, *Ecological Economics*, 19, 67-90.
- Tol, R.S.J. (1999a). *New estimates of the damage costs of climate change. Part I: Benchmark estimates*, (report n° D99/01), 29 p. Instituut voor Milieuvraagstukken (IVM), Vrije Universiteit Amsterdam, Amsterdam (the Netherlands).
- Tol, R.S.J. (1999b). *New estimates of the damage costs of climate change. Part II: Dynamic estimates*, (report n° D99/02), 37 p. Instituut voor Milieuvraagstukken (IVM), Vrije Universiteit Amsterdam, Amsterdam (the Netherlands).
- Tol, R.S.J. et S. Fankhauser (1997). *On the representation of impact in integrated assessment models of climate change*. IVM, Vrije Universiteit Amsterdam, Amsterdam (the Netherlands).
- Weiss, H. et R.S. Bradley (2001). What drives societal collapse?, *Science*, 609-610.
- World Bank (2002a). *Seas, Cities and Storms: Managing Change in Pacific Island Economies*, the World Bank, Washington D.C.
- World Bank (2002b). *World Development Indicators*, the World Bank, Washington D.C.
- Yohe, G.W. et M.E. Schlesinger (1998). Sea-level change: the expected economic cost of protection or abandonment in the United States, *Climatic Change*, 38, 337-342.

**Conclusion
générale**

Dans cette thèse, nous avons comparé les politiques climatiques optimales à court-terme que recommandent trois cadres d'analyse de la décision : une analyse coût-efficacité avec des contraintes sur l'amplitude et le rythme de l'évolution de la température moyenne globale (le modèle *RESPONSE_Θ*), une analyse coût-bénéfice en présence d'une 'Préférence pour la stabilité du climat' (le modèle *RESPONSE_Π*) et finalement une analyse coût-bénéfice avec une évaluation explicite des dommages climatiques (le modèle *RESPONSE_Δ*). Quatre leçons essentielles pour la réponse optimale pendant les prochaines décennies en présence d'incertitude se dégagent de ces exercices, suggérant dans l'ensemble une action précoce :

- Pour une analyse coût-efficacité, l'incertitude sur la sensibilité du climat implique de suivre une trajectoire d'émissions très contraignante à court-terme et ce, d'autant plus que l'information sur ce paramètre nous arrive tardivement (au-delà de 2030). Cette échéance doit être rapprochée de la cinquantaine d'années que prendra au minimum la refonte des systèmes énergétiques et plus largement, une évolution à la baisse des profils d'émissions des sociétés futures et doit être comparée au délai nécessaire pour qu'un signal clair sur la valeur de la sensibilité du climat émerge (au moins 2050, semble-t-il).
- Pour une analyse coût-bénéfice avec 'Préférence pour la sensibilité du climat', on n'obtient pas nécessairement des recommandations aussi strictes que précédemment. La trajectoire optimale d'émissions est notamment très sensible aux croyances du décideur : plus celui-ci est optimiste, plus elle s'éloigne de la trajectoire d'émissions correspondant au pire des cas certains. Cependant l'introduction d'une 'Préférence pour la stabilité du climat' n'implique pas systématiquement moins d'efforts de réduction des émissions : en univers certain, on observe certes à moyen- long-terme un dépassement temporaire de l'objectif désirable par rapport aux résultats obtenus dans des situations similaires pour une analyse coût-efficacité ; toutefois, à court-terme, les efforts entrepris n'en sont pas moins importants.
- Pour une analyse coût-bénéfice reposant sur une évaluation explicite des dommages, la nécessité d'une action précoce disparaît dans l'hypothèse de dommages modérés pour les cent prochaines années et croissant régulièrement avec l'amplitude du réchauffement, sauf quand l'hypothèse d'une valeur élevée pour la sensibilité du climat se voit accorder de plus en plus d'importance par le décideur (et dans un cas extrême, pour cette valeur en univers certain). Cependant, dès qu'on envisage l'éventualité de phases d'accélération dans les dommages imputables au franchissement de seuils de vulnérabilité climatique, environnementale ou sociale, on peut conclure à l'optimalité d'une action précoce sans faire l'hypothèse de dommages significatifs à long terme. Un tel résultat est renforcé en présence d'incertitude sur la sensibilité du climat (qui détermine la date à laquelle de tels seuils sont atteints) ou d'incertitude sur la forme de la fonction de dommages (et dans ce cas, on observe l'attraction de la trajectoire optimale d'émissions par l'occurrence potentielle de tels seuils)
- Au-delà de l'incertitude concernant la forme de la fonction de dommages, nous avons par ailleurs souligné que le niveau d'efforts à court-terme est particulièrement sensible aux spécifications des émissions de référence, du cycle du carbone et de la réponse du climat et à la manière dont est considérée l'incertitude portant sur chacun d'entre eux, tous ces éléments conditionnant, on l'a vu, le profil temporel des dommages (marginaux).

Dans ces exercices numériques, un outil nous a permis d'évaluer l'importance des incertitudes, selon la date à laquelle on peut espérer les réduire, et de les hiérarchiser entre elles : la valeur de l'information. On doit noter deux choses. D'une part, toutes les valeurs de l'information ont été calculées à partir de politiques climatiques optimales. Nous n'avons donc pas pris en compte comment de telles valeurs pouvaient se dégrader ou au contraire se renchérir en fonction des actions entreprises avant que l'état du monde avéré ne soit dévoilé : par exemple, si le Protocole de Kyoto n'entre pas en vigueur, [Peck et Teisberg, 1992] montrent dans un cadre coût-bénéfice (avec des dommages réguliers) que la valeur de l'information sur la sensibilité du climat à vingt ans explose (amplification d'un facteur 15), traduisant les surcoûts futurs d'avoir retardé la transition vers des sociétés moins émettrices (en particulier, s'il appert que la sensibilité du climat est élevée). Il serait intéressant de révéler de même, avec les hypothèses que nous avons employées, les regrets d'avoir repoussé les efforts de réduction des émissions.

D'autre part, nous avons représenté un apprentissage complètement exogène pour illustrer comment la stratégie optimale est sensible aux perspectives d'amélioration des connaissances scientifiques. Après avoir révélé son importance 'en creux', en testant différentes dates d'arrivée de l'information et différentes croyances, une perspective pourrait consister à représenter le phénomène d'acquisition de l'information dans le modèle *RESPONSE* pour examiner son influence sur la trajectoire optimale d'émissions (*dependent learning*), à l'image des travaux de [Kelly et Kolstad, 1999] qui utilisent à cette fin un mode d'apprentissage bayésien.

On peut ajouter une seconde série de remarques d'ordre méthodologique sur la prise en compte de l'aléa dans le modèle de décision et sur la représentation du processus de décision séquentielle comme traduction de la précaution. Nous avons retenu en effet comme interprétation couramment acceptée du Principe de précaution, la décision séquentielle, construite autour de la temporalité de l'action et de la temporalité de l'arrivée de nouvelles connaissances, et comme critère de décision dans l'incertain, l'espérance subjective de l'utilité selon le modèle de [Savage, 1954], en insistant sur le fait que les distributions employées traduisent des croyances sur l'occurrence d'un état du monde donné et que le point important consiste dans l'espoir d'améliorer nos connaissances sur ce point.

De nouvelles perspectives ont néanmoins récemment été ouvertes pour ce qui concerne la traduction mathématique et économique de la précaution, en cherchant à mieux représenter l'aléa qu'est le changement climatique¹ : tous les états du monde ne sont pas connus et ils ne sont pas probabilisables. Ce sont par exemple les approches *via* les probabilités imprécises pour éclairer la décision en présence d'ambiguïté [Ha Duong, 2003] ou l'appel à des modèles non additifs en employant les capacités de Choquet [Henry et Henry, 2002]. Leur application au cas des politiques climatiques dans un contexte dynamique en est encore à des balbutiements et il pourrait être fructueux de s'inspirer de ces recherches pour continuer les travaux de cette thèse. Sans faire appel à des développements aussi récents, des critères plus classiques de décision dans l'incertain mériteraient également d'être étudiés dans notre cas : par exemple, dans un cadre coût-efficacité, l'intégration d'une contrainte stochastique (on cherche à maintenir dans 90% des cas la dérive du climat en dessous d'un seuil donné) et on peut étudier comment la stratégie optimale se relâche quand on desserre l'intervalle de confiance ou qu'on applique une autre distribution à l'aléa ou de manière plus générale, le recours à des critères mixtes (comme le critère de [Hurwicz, 1951]) et on peut examiner de même la sensibilité de la politique climatique optimale au paramètre de prise en compte du pire des cas (pour une application très

¹ Voir [Ha Duong, 2002] pour une introduction.

sommaire au changement climatique dans un cadre statique, voir [Aaheim et Bretteville, 2001; Bretteville, 2003]).

Concluons en revenant au point de départ de cette thèse : l'absence d'évaluations fiables et non controversées des dommages climatiques pour fonder la décision. Rappelons-en pour la dernière fois les principales causes : on dispose en fait d'un chiffrage des impacts directs d'un changement climatique somme toute modéré pour certaines activités dans les pays développés à l'horizon d'une cinquantaine d'années, donc sans vision du long-terme ou des risques d'une perturbation plus importante du climat, sans vision des répercussions que pourraient entraîner ces impacts primaires sur les perspectives de croissance, sur certains secteurs ou certaines régions initialement peu exposées, sans vision des menaces sur les besoins fondamentaux des populations les plus vulnérables, du continent africain par exemple. En définitive, tout travail prospectif sur les dommages ne pourra acquérir une relative légitimité qu'au prix d'une compréhension de notre vulnérabilité présente et future au climat, comment celle-ci est modifiée par le changement climatique, comment les tendances du développement contribuent à l'atténuer ou à la renforcer et comment elles influencent également la mise en place à temps de stratégies d'adaptation appropriées.

C'est là un vaste et durable agenda de recherche mais dans l'attente, de quelle information se contentera-t-on pour encadrer les risques climatiques en vue d'éclairer la négociation et de décider des options d'adaptation ? Une des questions centrales est ici l'arbitrage entre entreprendre des efforts de réduction des émissions maintenant (alors qu'ils sont relativement coûteux et s'avéreront éventuellement inutiles *ex post*) ou financer des investissements d'adaptation pour réduire notre vulnérabilité au changement climatique en cours (avant que les bénéfices de l'abatement ne se manifestent), sachant qu'il existe de nombreuses options d'adaptation sans regret. Nous avons vu en introduction que dans le cadre de l'aide internationale au développement, c'est l'objet d'une controverse importante et elle appelle pour la dépasser une investigation poussée des risques climatiques et de nos potentiels d'adaptation. Certes, le modèle *RESPONSE* ne traite pas des liens entre perspectives de croissance et changement climatique : le modèle de croissance n'est pas complet et on ne peut représenter la rétroaction des impacts sur les sentiers de développement et nous ne pouvons pas explorer, du fait de la représentation très simplifiée des dommages, les liens entre développement et vulnérabilité. On ne peut donc pas évaluer la composante adaptation des politiques climatiques mais seulement leur composante mitigation (le volume et la répartition temporelle d'un budget carbone). Cependant, quelle que soit la mesure des bénéfices des politiques climatiques employée, on peut se rendre compte que nous obtenons des conclusions qualitatives relativement similaires, dans le sens de trajectoires d'émissions relativement strictes dès le court-terme sauf à faire le pari qu'il n'y a aucun risque. Dans l'attente d'évaluations robustes et non controversées, on peut ainsi avoir recours à une approximation successive des dommages et de notre vulnérabilité, dotée d'une véritable capacité opérationnelle. A l'image des différentes mesures que nous avons employées dans cette thèse, on peut faire appel à une série d'indicateurs de plus en plus proches de la réalité des impacts et des dommages au fur et à mesure que notre connaissance progresse : des faits saillants des évolutions du climat (indice d'aridité et risque de sécheresse, temps de retour des extrêmes, blocage de la mousson), puis en s'approchant des impacts, l'identification de préoccupations-clefs comme la régression de certains écosystèmes (mesurée avec des indices de type Köppen), les menaces sur le tourisme de montagne ou la culture du vin, puis une tentative d'estimer certains d'entre eux. De telles approches, on l'a vu, permettent de produire une information qui peut s'intégrer dans des cadres d'analyse de la décision et elles ont également le mérite de donner une représentation des risques très tangible pour les citoyens et leurs représentants. C'est une des directions que

commence à emprunter la recherche pour définir en quoi consiste un changement climatique dangereux² et ce sont là des perspectives captivantes.

Références bibliographiques

- Aaheim, H.A. et C. Bretteville (2001). *Decision-making frameworks for climate policy under uncertainty*, (Working Paper 2001-02). CICERO, Oslo (Norway).
- Bretteville, C. (2003). Decision criteria, scientific uncertainty, and the global warming controversy, *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change*, forthcoming.
- Ha Duong, M. (2002). *Introduction aux approches économiques de la gestion de l'incertitude*. CIRED.
- Ha Duong, M. (2003). Possible Global Warming Futures: an Imprecise Probability Theory Approach, Actes du colloque *Annual Meeting of the International Energy Workshop*, EMF/IEA/IIASA (org.), Laxenburg (Austria), 24-26 June 2003.
- Henry, C. et M. Henry (2002). Incertitude scientifique et principe de précaution, *Risques*, 49, 99-104.
- Hurwicz, L. (1951). *Optimality criteria for decision-making under ignorance*. Cowles Commission Discussion Paper, Chicago (IL).
- Kelly, D. et C.D. Kolstad (1999). Bayesian learning, growth, and pollution, *Journal of Economic Dynamic and Control*, 23, 491-518.
- Peck, S.C. et J.T. Teisberg (1992). CETA: a model for Carbon Emissions Trajectory Assessment, *The Energy Journal*, 13, 55-77.
- Savage, L. (1954). *The foundation of Statistics*, Wiley, New York.

² A l'instar des programmes de recherches européens PRUDENCE (prudence.dmi.dk/index.html) et ATEAM (www.pik-potsdam.de/ateam) ou du programme de l'OCDE 'Benefits of Climate Policy : Improving Information for Policy Makers' (www.oecd.org/dataoecd/0/23/21335749.pdf).

**Références
bibliographiques**

- Aaheim, H.A. et C. Bretteville (2001). *Decision-making frameworks for climate policy under uncertainty*, (Working Paper 2001-02). CICERO, Oslo (Norway).
- Aghion, P. et P. Howitt (2000). *Théorie de la croissance endogène*, Dunod, Paris.
- AIE/IEA (2003). *Cool appliances: Policy strategies for energy-efficient homes*, 231 p, AIE/IEA, Paris.
- Alcamo, J. et E. Kreileman (1996). Emissions scenarios and global climate protection, *Global Environmental Change*, 6 (4), 305-334.
- Alcamo, J., E. Kreileman, M. Krol, R. Leemans, J. Bollen, J. van Minnen, M. Schaeffer, S. Toet et B. de Vries (1998). Global modelling of environmental change: an overview of IMAGE 2.1, in *Global change scenarios of the 21st century: results from the IMAGE 2.1 Model*, E. Kreileman (dir.), p 3-94, Pergamon/Elsevier Science, Oxford (UK).
- Alley, R. (dir.) (2002). *Abrupt climate change: inevitable surprises*, National Academy Press, Washington DC.
- Ambrosi, P. et J.C. Hourcade (2003). Evaluer les dommages: une tâche impossible?, in *Les enjeux économiques de l'effet de serre*, R. Guesnerie (dir.), p 117-144, La Documentation Française, Paris.
- Ambrosi, P., J.C. Hourcade, S. Hallegatte, F. Lecocq, P. Dumas et M. Ha Duong (2003). Optimal control models and elicitation of attitudes towards climate damages, *Environmental Modeling and Assessment*, 8 (3), 133-147.
- Ambrosi, P., J.C. Hourcade et H. Le Treut (2002). Spatialisation des dommages et incertitude: primes de risques régionales et agrégation, in *Modélisation intégrée, évaluation des risques climatiques et des politiques de précaution: Programme GICC (Mete/MIES/Ademe), Rapport final*, H. Le Treut (dir.).
- Andronova, N.G. et M.E. Schlesinger (2001). Objective estimation of the probability density function for climate sensitivity, *Journal of Geophysical Research*, 106 (D19), 22605-22611.
- Arrhenius, S. (1896). On the influence of carbonic acid in the air upon the temperature of the ground, *Philosophical Magazine*, 41 (251), 237-276.
- Arrow, K.J. (1995). Effet de serre et actualisation, *Revue de l'Energie* (471), 631-636.
- Arrow, K.J. et A.C. Fisher (1974). Environmental preservation, uncertainty and irreversibility, *Quarterly Journal of Economics*, 88 (1), 312-319.
- Ayres, R.U. (2001). How economist have misjudged global warming, *World Watch*: Spetember/October.
- Ayres, R.U. et J. Walter (1991). *The greenhouse effect: damages, costs and abatement*, 50 p, IIASA, Laxenburg (Austria).
- Azar, C. (1999). Weight factors in cost-benefit analysis of climate change, *Environmental and Resource Economics*, 13, 249-268.
- Azar, C. et T. Sterner (1996). Discounting and distributional considerations in the context of global warming, *Ecological Economics*, 19, 168-184.
- Azariadis, C. et R. Guesnerie (1986). Sunspots and cycles, *Review of Economic Studies*, 53 (4), 725-737.
- Balvers, R. et T. Cosimano (1990). Active learning about demand and the dynamics of price adjustment, *The Economic Journal*, 100, 882-898.
- Barnett, J. et N. Adger (2001). *Climate Dangers and Atoll Countries*, (WP n°9). Tyndall Centre, Norwich (UK).
- Baron, R. et J.C. Hourcade (1994). The bottom-up versus top-down controversy: A useful provocation for economic research on environment and technological change, Actes du colloque *50th congress of the*

International Institute of Public Finance: Public finance, environment and natural resources, Harvard (MA), 22-25 August 1994.

- Barro, R.J. (1991). Economic growth in a cross section of countries, *Quarterly Journal of Economics*, 106, 407-444.
- Beniston, M. (2000). Impacts potentiels sur l'environnement alpin au XXI^{ème} siècle, Actes du colloque *Les changements climatiques et leurs incidences sur le milieu montagnard*, Chamonix (France), 29-30 juin.
- Berk, M., J. van Minnen, B. Metz et W. Moonaw (2001a). *Climate OptiOns for the Long term (COOL): Global dialogue synthesis report*, RIVM report n° 410200118, RIVM (National Institute of Public Health and the Environment), Bilthoven (the Netherlands).
- Berk, M., J. van Minnen, B. Metz et W. Moonaw (2001b). *Keeping our options open: A strategic vision on near-term implications of long-term climate policy option*, 38 p, RIVM - COOL Project, Bilthoven (the Netherlands).
- Berz, G. (2001). Insuring against catastrophe, *Our planet (UNEP): Special issue on Disasters*.
- Besancenot, J.P. (2000). Incidences possibles du réchauffement climatique sur la santé en France métropolitaine et dans les DOM-TOM au XXI^{ème} siècle, in *Impacts potentiels du changement climatique en France au XXI^{ème} siècle*, MATE (dir.), p 111-121, Paris.
- Besancenot, J.P., K. Laaidi et M. Laaidi (2002). Mortalité en France selon le contexte thermique: réalité présente et scénarios pour le XXI^{ème} siècle, Actes du colloque *Programme "Gestion et Impacts du Changement Climatique" (GICC): Séminaire de restitution*, MEDIAS FRANCE (org.), Toulouse (France), 25-26 avril 2002.
- Bishop, A.B. (1986). Resource valuation under uncertainty: theoretical principles for empirical research, in *Advances in applied micro-economics*, V.K. Smith (dir.), JAI Press, Greenwich (CT).
- BMU (2002). *Climate Change and Conflict*, das Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU), Berlin (Germany).
- Bretteville, C. (2003). Decision criteria, scientific uncertainty, and the global warming controversy, *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change, forthcoming*.
- Broecker, W.S. (1997). Thermohaline circulation, the Achilles heel of our climate system: will man-made CO₂ upset the current balance?, *Science*, 278 (28 November 1997), 1582-1588.
- Bruce, J.P., H. Lee et E.F. Haïtes (dir.) (1996). *Climate change 1995: Economic and social dimensions of climate change. Contribution of Working Group III to the Second Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, Cambridge University Press, Cambridge (UK&US).
- Buddemeier, R.W., J.A. Kleypas et R.B. Aronson (2004). *Coral reefs & Global climate change: Potential Contributions of Climate Change to Stresses on Coral Reef Ecosystems*, 48 p, Pew Center on Global Climate Change, Washington D.C.
- Burke, L., D. Bryant, J.W. McManus et M. Spalding (1998). *Reefs at Risk: A map-based indicator of threats to the world's coral reefs*, World Resources Institute (WRI), ICLARM, WCMC, UNEP, Washington D.C.
- Burnouf, J. (2003). Mémoires environnementales contre amnésie sociale: la question du temps long dans l'espace des sociétés pour comprendre les événements extrêmes (chronologie, datation, durée), Actes du colloque *Changements globaux: vulnérabilité, adaptabilité, apprentissage; Apport des sciences humaines et sociales*, INED (org.), Paris (France), 10 décembre 2003.
- Caldeira, K., A.K. Jain et M.I. Hoffert (2003). Climate sensitivity uncertainty and the need for energy without CO₂ emission, *Science*, 299 (5615:28 March 2003), 2052-2054.

- Carter, T.R., M. Hulme et D. Viner (dir.) (1999). *Representing uncertainty in climate change scenarios and impact studies: EU Concerted Action ECLAT-2 1st Workshop Report (Helsinki, Finland, 14-16 April 1999)*, 129 p, Climate Research Unit, UEA, Norwich (UK).
- Chichilnisky, G. et G. Heal (1993). Global Environmental Risks, *Journal of Economic Perspectives*, 7 (4), 65-86.
- Cicchetti, C.J. et A.M. Freeman (1971). Option demand and consumer's surplus: further comment, *Quarterly Journal of Economics*, 85 (3), 528-539.
- Cline, W.R. (1992). *The Economics of Global Warming*, Institute for International Economics, Washington, D.C.
- Costanza, R., R. d'Arge, R. de Groot, S. Farber, M. Grasso, B. Hannon, K. Limburg, S. Naeem, R.V. O'Neill, J. Paruelo, R.G. Raskin, P. Sutton et M. van den Belt (1997). The value of the world's ecosystem services and natural capital, *Nature*, 387, 253-260.
- Cox, P.M., R.A. Betts, C.D. Jones, S.A. Spall et I.J. Totterdell (2000). Acceleration of global warming due to carbon-cycle feedbacks in a coupled model, *Nature*, 408, 184-187.
- Dalton, M.G. (1997). The welfare bias from omitting climatic variability in economic studies of global warming, *Journal of Environmental Economics and Management* (33), 221-239.
- David, P.A. (1985). Clio and the economics of QWERTY, *American Economic Review*, 76, 332-337.
- Davis, D., A. Krupnick et G. McGlynn (2000). Ancillary benefits and costs of greenhouse gases mitigation: an overview, Actes du colloque *Ancillary benefits and costs of greenhouse gases mitigation*, OECD (org.), Washington D.C.
- den Elzen, M.G.J., M. Berk, S. Both, A. Faber et R. Oostemrijk (2000). *FAIR 1.0: An interactive model to explore options for differentiation of future commitments in international climate policy making*, RIVM report n° 728001013, RIVM (National Institute of Public Health and the Environment), Bilthoven (the Netherlands).
- den Elzen, M.G.J., M. Berk, M. Schaeffer, J. Olivier, C. Hendriks et B. Metz (1999). *The Brazilian proposal and other options for International Burden Sharing: an evaluation of methodological and policy aspects using FAIR*, RIVM report n° 728001011, RIVM (National Institute of Public Health and the Environment), Bilthoven (the Netherlands).
- Deneux, M. (2002). *L'évaluation de l'ampleur des changements climatiques, de leurs causes et de leur impact prévisible sur la géographie de la France à l'horizon 2025, 2050 et 2100*, Rapport n° 3603 (Ass. Nationale n° 224 (Sénat), Office parlementaire d'évaluation des choix scientifiques et technologiques (Assemblée nationale, Sénat), Paris.
- Domar, E. (1946). Capital expansion, rate of growth, and employment, *Econometrica*, 14 (2), 137-147.
- Dowlatabadi, H. (1999). Integrated assessment: implications of uncertainty, in *Encyclopaedia of Life Support Systems*, Oxford University Press, Oxford.
- Dowlatabadi, H. et M.G. Morgan (1993). A model framework for integrated assessment of the climate problem, *Energy Policy*, 21, 209-221.
- Dowlatabadi, H. et M.G. Morgan (1995). *Integrated climate Assessment Model 2.0: Technical discussion*. Department of Engineering and Public Policy, Carnegie Mellon University, Pittsburgh (PA).
- Dumas, P. et M. Ha Duong (2001). Non-linearities and uncertain climate impacts, Actes du colloque *Energy Modelling Forum (EMF)*, Laxenburg (Austria), 19-21 june 2001.
- Easterling, D., G.A. Meehl, C. Parmesan, S.A. Changnon, T.R. Karl et L.O. Mearns (2000). Climate extremes: observations, modeling and impacts, *Science*, 298, 2068-2074.

- EMF (1997). *EMF-14: Integrated Assessment of Climate Change*. Energy Modelling Forum, Stanford University, Stanford (CA).
- EMF (1999). *EMF-16: Economic and Energy System Impacts of the Kyoto Protocol: Result from the Energy Modelling Forum Study*. Energy Modelling Forum, Stanford University, Stanford (CA).
- European Commission (1996). Communication on Community Strategy on Climate change: Council Conclusions, European Commission, Brussels (Belgium).
- Eyre, N., T. Downing, R. Hoekstra, K. Rennings et R.S.J. Tol (1999). *ExternE (Externalities of Energy): Global Warming Damages*, Contract JOS3-C95-0002, European Commission: DG XII (Science, Research and Development).
- Fankhauser, S. (1994). The economic costs of climate change: a survey, *Global Environmental Change*, 4 (4), 301-309.
- Fankhauser, S. (1995). *Valuing climate change: the Economics of the Greenhouse*, Earthscan, London (UK).
- Fankhauser, S. et R.S.J. Tol (2002). *On climate change and economic growth*. Research Unit Sustainability and Global Change, Centre for Marine and Climate Research, Hamburg University, Hamburg (Germany).
- Fankhauser, S., R.S.J. Tol et D.W. Pearce (1997). The aggregation of climate change damages: a welfare theoretic approach, *Environmental and Resource Economics*, 10, 249-266.
- FAO (2002). FAOSTAT, FAO, Rome (Italy).
- Farrow, S. (1998). Environmental equity and sustainability: rejecting the Hicks-Kaldor criteria, *Ecological Economics*, 27, 183-188.
- FFSA (2000). Tempêtes de décembre 1999: coûts, indemnisation et enseignements, *Assurer*: 118.
- Fischer, G., S. Mahendra et H. van Velthuizen (2002). *Climate Change and Agricultural Vulnerability*, 160 p, IIASA, Laxenburg (Austria).
- Fisher, A.C. et W.M. Hahnemann (1993). Assessing climate change risks: valuation of effects, Actes du colloque *Assessing surprises and nonlinearities in greenhouse warming*, M.A. Toman (org.), RFF, Washington DC, May 1993.
- Fisher, A.C. et M. Hanemann (1986). Option value and the extinction of species, in *Advances in applied micro-economics*, V.K. Smith (dir.), p 169-190, JAI Press, Greenwich (CT).
- Fisher, A.C. et M. Hanemann (1987). Quasi-option value: some misconception dispelled, *Journal of Environmental Economics and Management*, 14, 183-190.
- Forest, C.E., P.H. Stone, A.P. Sokolov, M.R. Allen et M.D. Webster (2002). Quantifying uncertainties in climate system properties with the use of recent climate observations, *Science*, 295 (5552), 113-117.
- Forrester, J.W. (1971). *World Dynamics*, Wright-Allen Press, Cambridge (MA).
- Friedlingstein, P., L. Bopp, P. Ciais, J.-L. Dufresne, L. Fairhead, H. Le Treut, P. Monfray et J.C. Orr (2001). Positive feedback between future climate change and the carbon cycle, *Geophysical Research Letters*, 28, 1543-1546.
- Funtowicz, S.O. et J.R. Ravetz (1990). *Uncertainty and Quality in Science for Policy*, Kluwer Academic Press, Dordrecht (the Netherlands).
- Giles, J. (2002). When doubt is a sure thing, *Nature*, 418 (August 2002, 1st), 476-478.
- Godard, O. (1999). De l'usage du principe de précaution en univers controversé, *Futuribles* (239-240), 37-60.

- Goulder, L.H. et D. Kennedy (1997). Valuing Ecosystems Services: Philosophical Bases and Empirical Methods, in *Nature's Services: Societal dependence on natural ecosystems*, G.C. Daily (dir.), p 23-47, Island Press, Washington D.C.
- Goulder, L.H. et K. Mathai (2000). Optimal CO₂ Abatement in the Presence of Induced Technological Change, *Journal of Environmental Economics and Management* (39), 1-38.
- Grésillon, J.-M. (2003). L'effet des inondations, aspects hydrauliques de la vulnérabilité, Actes du colloque *Les élus face aux risques climatiques*, ONERC (org.), Muséum d'Histoire Naturelle (Paris), 23-24 juin 2003.
- Gritsevskiy, A. et N. Nakicenovic (2000). Modeling uncertainty of induced technological change, *Energy Policy*, 28, 907-921.
- Grubb, M. (1993). The costs of climate change: critical elements, in *Costs, impacts and benefits of CO₂ mitigation*, F.L. Toth (dir.), p 153-166, IIASA, Laxenburg (Austria).
- Guesnerie, R. (2003). *Kyoto et l'économie de l'effet de serre*, 265 p, La Documentation Française, Paris.
- Ha Duong, M. (1998a). *Comment tenir compte de l'irréversibilité dans l'évaluation intégrée du changement climatique?*, Thèse de Doctorat, Analyse et politique économique, Ecole des Hautes Etudes en Sciences Sociales (EHESS), Paris.
- Ha Duong, M. (1998b). Quasi-option value and climate policy choices, *Energy Economics*, 20, 599-620.
- Ha Duong, M. (2002). *Introduction aux approches économiques de la gestion de l'incertitude*. CIRED.
- Ha Duong, M. (2003). Possible Global Warming Futures: an Imprecise Probability Theory Approach, Actes du colloque *Annual Meeting of the International Energy Workshop*, EMF/IEA/IIASA (org.), Laxenburg (Austria), 24-26 June 2003.
- Ha Duong, M., M. Grubb et J.C. Hourcade (1997). Influence of socioeconomic inertia and uncertainty on optimal CO₂-emission abatement, *Nature*, 390, 270-274.
- Ha Duong, M., J.C. Hourcade et F. Lecocq (1999). Dynamic consistency problems behind the Kyoto Protocol, *International Journal of Environment and Pollution*, 11 (4), 426-446.
- Hallegatte, S. (2003). Assessing the Climate-Economy Feedback through Characteristic Time Interplays, *submitted to Journal of Economic Dynamics and Control*.
- Hammit, J.K. (1999). Evaluation endpoints and climate policy: atmospheric stabilisation, benefit-cost analysis and near-term green-house gas emissions, *Climatic Change*, 41, 447-468.
- Hammit, J.K., R.J. Lempert et M.E. Schlesinger (1992). A sequential-decision strategy for abating climate change, *Nature*, 357, 315-318.
- Hanemann, M. (1989). Information and the concept of option value, *Journal of Environmental Economics and Management*, 16, 23-37.
- Hanemann, M. (2002). Market benefits/impacts of climate change, Actes du colloque *OECD Workshop on the Benefits of climate policy: improving information for policy makers*, OECD (Paris), 12-13 dec. 2002.
- Hansen, J., M. Sato, R. Ruedy, A. Lacis et V. Oinas (2000). Global warming in the twenty-first century: an alternative scenario, *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 97 (18), 9875-9880.
- Harrod, R. (1939). An essay in dynamic theory, *Economic Journal*, 49 (193), 14-33.
- Haug, G.H., D. Günther, L.C. Peterson, D.M. Sigman, K.A. Hughen et B. Aeschlimann (2003). Climate and the collapse of Maya civilization, *Science*, 299 (5613 (14 Mar.)), 1731-1735.
- Hausmann, P. (1999). *Les inondations: un risque assurable*, 51 p, Swiss Re, Zürich (Switzerland).

- Heal, G.M. (2001). *Intertemporal Welfare Economics and the Environment*. Columbia Business School, Columbia University, New York.
- Henry, C. (1974). Investment decisions under uncertainty: the irreversibility effect, *American Economic Review*, 64, 1006-1012.
- Henry, C. et M. Henry (2002). Incertitude scientifique et principe de précaution, *Risques*, 49, 99-104.
- Hirshleifer, J. et J.G. Riley (1992). *The analytics of uncertainty and information*, 465 p, Cambridge University Press, Cambridge (UK).
- Hoegh-Guldberg, O., H. Hoegh-Guldberg, D.K. Stout, H. Cesar et A. Timmerman (2000). *Pacific in Peril: Biological, Economic and Social Impacts of Climate change on Pacific coral Reefs*, 71 p, Greenpeace.
- Hoffert, M.I. et C. Covey (1992). Deriving global climate sensitivity from paleoclimate reconstructions, *Nature*, 360, 573-576.
- Hope, C., J. Anderson et P. Wenman (1993). Policy Analysis of the Greenhouse Effect: An Application of the PAGE Model, *Energy Policy*, 21 (3), 327-338.
- Hope, C. et P. Maul (1996). Valuing the impact of CO₂ emissions, *Energy Policy*, 24 (3), 211-219.
- Hordijk, L., J. van Aardenne et C. Kroeze (1999). Integrated assessment models and uncertainty analysis, Actes du colloque *EFIEA Workshop on Uncertainty*, Baden (Austria), 10-18 July 1999.
- Houghton, J.T., Y. Ding, D.J. Griggs, P.J. Noguer, P.J. van der Linden, X. Dai, K. Maskell et C.A. Johnson (dir.) (2001). *Climate change 2001: the scientific basis. Contribution of Working Group I to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, Cambridge University Press, Cambridge (UK&US).
- Hourcade, J.C. (1992). L'effet de serre: des bons et mauvais usages d'une provocation, *Etudes* (mai), 635-645.
- Hourcade, J.C. (1994). No-regret potentials and technical innovation: a viability approach to integrative assessment of climate policies, in *Integrative assessment of mitigation, impacts and adaptation to climate change*, F.L. Toth (dir.), p 535-558, IIASA, Laxenburg (Austria).
- Hourcade, J.C. (1996). Aspects socio-économiques (du Groupe III à la Synthèse): consensus espéré ou artefact rhétorique?, *Les Cahiers de Global Chance* (7), 63-72.
- Hourcade, J.C. (1997). Précaution et approche séquentielle de la décision face aux risques climatiques de l'effet de serre, in *Le principe de précaution dans la conduite des affaires humaines*, A. Godard (dir.), p 259-294, MSH/INRA, Paris.
- Hourcade, J.C. (1998). Débat autour du principe de précaution, *Natures, Sciences, Sociétés*, 6 (1), 41-45.
- Hourcade, J.C. et T. Chapuis (1995). No-regret potentials and technical innovation, *Energy Policy*, 23 (4/5), 433-445.
- Hourcade, J.C. et F. Ghersi (2002). The economics of a lost deal : Kyoto - The Hague - Marrakesh, *The Energy Journal*, 23 (3), 1-26.
- Hourcade, J.C., F. Lecocq, T. Le Pesant et D. Théry (2002). L'économiste au risque des arguments d'équité: le cas des politiques climatiques, in *Régulation environnementale: jeux, coalitions, contrats.*, G. Rotillon (dir.), p 196, Economica, Paris.
- Hourcade, J.C., J.-M. Salles et D. Théry (1992). Ecological economics and scientific controversies: Lessons from some recent policy making in the EEC., *Ecological Economics*, 6, 211-233.
- Hulme, M. et T.R. Carter (1999). Representing uncertainty in climate change scenarios and impact studies, in *Representing uncertainty in climate change scenarios and impact studies: EU Concerted Action ECLAT-*

- 2 1st Workshop Report (Helsinki, Finland, 14-16 April 1999), D. Viner (dir.), p 13-39, Climate Research Unit, UEA, Norwich (UK).
- Hurwicz, L. (1951). *Optimality criteria for decision-making under ignorance*. Cowles Commission Discussion Paper, Chicago (IL).
- IEA (2002). *World Energy Outlook*, OECD/IEA, Paris.
- IEA/AIE (2001). *Electricity Information 2001*, IEA/AIE, Paris.
- IFEN (2000). *Aménagement du territoire et environnement: politiques et indicateurs*, 272 p, IFEN, Orléans (France).
- Jaccard, M. (1997). *Heterogeneous Capital Stocks and Decarbonating the Atmosphere: Does Delay Make Cents?*, 37 p. School of Resource and Environmental Management, Simon Fraser University.
- Jacoby, H.D. (2002). Informing climate policy given incommensurable benefits estimates, Actes du colloque *OECD Workshop on the Benefits of climate policy: improving information for policy makers*, OECD (Paris), 12-13 dec. 2002.
- Jensen, M.N. (2003). Consensus on Ecological Impacts Remains Elusive, *Science*, 299, 38.
- Jevons, W.S. (1865). *The Coal Question: an inquiry concerning the progress of the Nation, and the probable exhaustion of our coal-mines.*, MacMillan, London.
- Kaldor, N. (1961). Capital Accumulation and Economic Growth, in *The Theory of Capital*, V. Hague (dir.), p 177-222, St Martin's Press, NY.
- Kalnay, E. et M. Cai (2003). Impact of urbanization and land-use change on climate, *Nature*, 423 (29 May 2003), 528-531.
- Kandel, R. (2002). *Le réchauffement climatique*, 127 p, PUF, Paris.
- Kann, A. (1998). *A comparison of approaches for performing uncertainty analysis in integrated assessment models*, (WP 14.4). Energy Modelling Forum (EMF), Stanford University, Stanford (CA).
- Katz, R.W. (1999). Techniques for estimating uncertainty in climate change scenarios and impact studies, in *Representing uncertainty in climate change scenarios and impact studies: EU Concerted Action ECLAT- 2 1st Workshop Report (Helsinki, Finland, 14-16 April 1999)*, D. Viner (dir.), p 40-55, Climate Research Unit, UEA, Norwich (UK).
- Kelly, D. et C.D. Kolstad (1999a). Bayesian learning, growth, and pollution, *Journal of Economic Dynamic and Control*, 23, 491-518.
- Kelly, D. et C.D. Kolstad (1999b). Integrated assessment models for climate change control, in *Yearbook of environmental and resource economics 1999/2000*, Tietenberg (dir.), p 171-197.
- Kelly, D., C.D. Kolstad, M.E. Schlesinger et N.G. Andronova (2000). Learning About Climate Sensitivity From the Instrumental Temperature Record.
- Kolstad, C.D. (1994). The timing of CO₂ control in the face of uncertainty and learning, in *International environmental economics*, E. van Ireland (dir.), Elsevier, Amsterdam (the Netherlands).
- Kolstad, C.D. (1996a). Fundamental irreversibilities in stock externalities, *Journal of Public Economics* (60), 221-233.
- Kolstad, C.D. (1996b). Learning and stock effects in environmental regulation: the case of greenhouse gas emissions, *Journal of Environmental Economics and Management* (31), 1-18.
- Kolstad, C.D. (2000). *Environmental Economics*, 400 p, Oxford University Press, NY (NY).

- Koopmans, T.C. (1965). On the Concept of Optimal Economic Growth, in *The Econometric Approach to Development Planning*, p 225-287, North-Holland, Amsterdam.
- Krause, F., W. Bach et J. Koomey (1989). *Energy policy in the greenhouse (Final report)*, International Project for Sustainable Energy Paths (IPSEP), El Cerrito (CA).
- Kristrom, B. et P. Riera (1996). Is the income elasticity of environmental improvements less than one?, *Environmental and Resource Economics*, 7, 45-55.
- Krugman, P. (1991). History versus Expectations, *The 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.
- Lave, L.B. et H. Dowlatabadi (1993). Climate Change: The Effects of Personal Beliefs and Scientific Uncertainty, *Environ. Sci. Technol.*, 27 (10), 1962-1972.
- Le Treut, H. et V. Serafini (2002). Modélisation intégrée et incertitudes sur les dommages du changement climatique: programme de recherche autour du modèle IMAGE, in *Modélisation intégrée, évaluation des risques climatiques et des politiques de précaution: Programme GICC (Mete/MIES/Ademe), Rapport final*, H. Le Treut (dir.).
- Lecocq, F. (2000). *Distribution spatiale et temporelle des coûts des politiques publiques sous incertitudes: théorie et pratique dans le cas de l'effet de serre*, Thèse de Doctorat, Sciences de l'environnement, Ecole Nationale du Génie Rural, des Eaux et Forêts (ENGREF), Paris.
- Lecocq, F. et R. Crassous (2003). *International Climate Regime beyond 2012: Are Quota Allocation Rules Robust to Uncertainty?*, (# 3000), 39 p. Infrastructure and Environment, Development Research Group, the World Bank Group, Washington D.C.
- Lecocq, F. et J.C. Hourcade (2003a). Equitable Provision of Long-Term Public Goods: The Role of Negotiation Mandates, *submitted to Journal of Public Economics*.
- Lecocq, F. et J.C. Hourcade (2003b). Incertitude, irréversibilités et actualisation dans les calculs économiques sur l'effet de serre, in *Les enjeux économiques de l'effet de serre*, R. Guesnerie (dir.), p 177-199, La Documentation Française, Paris.
- Leimbach, M., T. Bruckner, M. Füßel, A. Gritsevskii, G. Klepper, G. Petschel-Held, R. Sands, L. Schrattenholzer, K. Springer et F. Toth (2000). *ICLIPS-integrated assessment of climate protection strategies: Political and economic contributions*, 115 p, Potsdam-Institut für Klimafolgenforschung (PIK), Potsdam (Germany).
- Lempert, R.J., M.E. Schlesinger et J.K. Hammitt (1994). The impact of potential abrupt climate changes on near-term policy choices, *Climatic Change*, 24, 351-376.
- Lomborg, B. (2001). *The Skeptical Environmentalist: measuring the real state of the world*, 540 p, Cambridge University Press, Cambridge (UK&US).
- Lutz, W., W. Sanderson, S. Scherbov et A. Goujon (1997). Doubling of World population unlikely, *Nature*, 387 (6635), 803-805.
- Maddison, A. (1995). *L'économie mondiale 1820-1992: Analyse et statistiques*, 274 p, OCDE/OECD, Paris.
- Maddison, D. (dir.) (2001). *The Amenity Value of Climate*, 160 p, Earthscan, London (UK).
- Manabe, S. et R.J. Stouffer (1988). Two-stable equilibria of a coupled ocean-atmosphere model, *Journal of Climate*, 1, 841-866.
- Manne, A.S., R. Mendelsohn et R. Richels (1995). MERGE - A Model for Evaluating Regional and Global Effects of GHG Reduction Policies, *Energy Policy*, 23 (1), 17-34.

- Manne, A.S. et R. Richels (1992). *Buying Greenhouse Insurance: The Economic Cost of CO₂ Emissions limits*, MIT Press, Cambridge (MA).
- Manne, A.S. et R. Richels (1995). The Greenhouse Debate: Economic Efficiency, Burden Sharing and Hedging Strategies, *Energy Journal*, 16(4), 1-37.
- Manne, A.S. et R. Richels (1999). The Kyoto Protocol: a cost-effective strategy for meeting environmental objectives?, *The Energy Journal, Kyoto Special Issue*, 1-25.
- Manne, A.S. et T.F. Rutherford (1994). International Trade in Oil, Gas and Carbon Emission Rights: an Intertemporal General Equilibrium Model, *The Energy Journal*, 15(1), 57-76.
- Martin, E. (2000). Modification de la couverture neigeuse, in *Impacts potentiels du changement climatique en France au XXI^{ème} siècle*, MATE (dir.), p 54-57, Paris.
- McCarthy, J.J., O.F. Canziani, N.A. Leary, D.J. Dokken et K.S. White (dir.) (2001). *Climate Change 2001: Impacts, adaptation and vulnerability. Contribution of Working Group II to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, Cambridge University Press, Cambridge (UK & US).
- Meadows, D., J. Randers et W. Behrens (1972). *The limits to growth*, Universe Books, NY.
- Mégie, G. (1997). Incertitude scientifique et décision politique: le cas "historique" de l'ozone stratosphérique, in *Le principe de précaution dans la conduite des affaires humaines*, A. Godard (dir.), p 215-244, MSH/INRA, Paris.
- Mendelsohn, R. et A. Dinar (1999). Climate Change, Agriculture and Developing Countries: Does Adaptation Matter?, *The World Bank Research Observer*, 14(2), 277-293.
- Mendelsohn, R., W. Morrison, M.E. Schlesinger et N.G. Andronova (1997). *Country-Specific Market Impacts of Climate Change*, crga.atmos.uiuc.edu/publications/market_impacts/text.html.
- Mendelsohn, R., W. Morrison, M.E. Schlesinger et N.G. Andronova (2000). Country-Specific Market Impacts of Climate Change, *Climatic Change*, 45, 553-569.
- Mendelsohn, R., W. Nordhaus et D. Shaw (1994). The Impact of Global Warming on Agriculture: A Ricardian Analysis, *The American Economic Review*, 84(4), 753-771.
- Metz, B., D. Ogunlade, R. Swart et J. Pan (dir.) (2001). *Climate Change 2001: Mitigation. Contribution of Working Group III to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, Cambridge University Press, Cambridge (UK & US).
- Moreau, L. (2000). Observe-t-on déjà les effets du réchauffement climatique dans les Alpes?, Actes du colloque *Les changements climatiques et leurs incidences sur le milieu montagnard*, Chamonix (France), 29-30 juin 2000.
- Morgan, M.G. et M. Henrion (1990). *Uncertainty: a guide to dealing with uncertainty in quantitative risk and policy analysis*, 332 p, Cambridge University Press.
- Morgan, M.G. et D.W. Keith (1995). Subjective Judgments By Climate Experts, *Environmental Science & Technology*, 29, 468-476.
- Mori, S. (2000). The development of greenhouse gas emissions scenarios using an extension of the MARIA model for the assessment of resource and energy technologies, *Technological forecasting and social change*, 63(2-3).
- Mori, S. et K. Takahashi (1999). An integrated assessment model for the evaluation of new energy technologies and food productivity, *International Journal of Global Energy Issues*, 11(1-4), 1-18.
- Moss, R. et S.H. Schneider (2000). Uncertainties in the IPCC TAR: Recommendations To Lead

- Authors For More Consistent Assessment and Reporting, in *Guidance Papers on the Cross Cutting Issues of the Third Assessment Report of the IPCC*, K. Tanaka (dir.), p 33-52, OMM/WMO, Geneva.
- Müller, B. (2002). *Equity in Global Climate Change: The Great Divide*, Oxford Institute for Energy Studies.
- Münich Re (1999). *Annual review of natural catastrophes 1999*, München (Germany).
- Münich Re (2000). *World of Natural Hazards*, CDROM.
- Münich Re (2003). *topics: Natural Catastrophes 2002*, 48 p, München Re, München (Germany).
- Nakicenovic, N. (dir.) (2000). *Special Report on Emissions Scenarios: a special report of Working Group III of the Intergovernmental Panel on Climate change*, Cambridge University Press, Cambridge (UK&US).
- Newell, R.G. et A.W. Pizer (2001). *Discounting the benefits of climate change mitigation*, 37 p, Pew Center on Global Climate Change, Washington DC.
- Nicholls, R., F.M.J. Hoozemans et M. Marchand (1999). Increasing flood risk and wetland losses due to global sea-level rise, *Global Environmental Change*, 9 (Special Issue 'A new assessment of global effects of climate change'), 69-87.
- Nordhaus, W. (1973). World dynamics: measurement without data, *The Economic Journal*, 83 (332), 1156-1183.
- Nordhaus, W. (1991). To slow or not to slow: The economics of the greenhouse effect, *Economic Journal*, 101 (407), 920-937.
- Nordhaus, W. (1992). An optimal transition path for controlling greenhouse effect, *The Economic Journal*, 101, 920-937.
- Nordhaus, W. (1993a). Optimal Greenhouse-Gas Reductions and Tax Policy in the "DICE" Model, *American Economic Review*, 83, 313-317.
- Nordhaus, W. (1993b). Rolling the 'DICE': An Optimal Transition Path for Controlling Greenhouse Gases, *Resource and Energy Economics*, 15, 27-50.
- Nordhaus, W. (1994a). Expert opinion on climatic change, *American Scientist*, 82, 45-52.
- Nordhaus, W. (1994b). *Managing the Global Commons: the Economics of Climate Change*, MIT Press, Cambridge(MA, USA).
- Nordhaus, W. (1998). New Estimates of the Economic Impacts of Climate Change, pp. 23.
- Nordhaus, W. et J.G. Boyer (1999a). Requiem for Kyoto: An Economic Analysis of the Kyoto Protocol, *The Energy Journal*, 20 (Special Issue: The Costs of the Kyoto Protocol), 93-130.
- Nordhaus, W. et J.G. Boyer (2000). *Warming the world: Economics models of Climate Change*, 246 p, MIT Press, Cambridge (MA, USA).
- Nordhaus, W. et R. Boyer (1999b). *Warming the world: Economics models of Climate Change*, MIT Press, Cambridge (MA, USA).
- Nordhaus, W. et D. Popp (1997). What is the value of scientific knowledge?, *The Energy Journal*, 18 (1), 1-45.
- Nordhaus, W. et J. Tobin (1973). Is growth obsolete?, in *The measurement of Economics and Social Performance*, M. Moss (dir.), NBER.
- Nordhaus, W. et Z. Yang (1996). RICE:A Regional Dynamic General-Equilibrium Model of Alternative Climate-Change Strategies, *American Economic Review*, 86 (4), 741-765.
- OCDE (2001). *L'APD reste stable, les autres apports diminuent.*, Paris (France).

- OMM/WMO (2002). *Déclaration de l'OMM sur l'état du climat mondial en 2001*, OMM - n°940, OMM/WMO, Genève (Switzerland).
- OMM/WMO (2003). *According to the World Meteorological Organization, extreme weather events might increase. (Press Release n° 695)*, Geneva, 2 July 2003.
- O'Neill, B.C. et M. Oppenheimer (2002). Dangerous Climate Impacts and the Kyoto Protocol, *Science*, 296 (14 June 2002), 1971-1972.
- Palmer, T.N. et J. Räisänen (2002). Quantifying the risk of extreme seasonal precipitation events in a changing climate, *Nature*, 415 (31 jan. 2002), 512-514.
- Parmesan, C. et G. Yohe (2003). A globally coherent fingerprint of climate change impacts across natural systems, *Nature*, 421, 37-42.
- Parry, M. (1999). New estimates of climate change impacts, *Global Environmental Change* (Special issue "A new assessment of the global effects of climate change").
- Parry, M., N. Arnell, M. T., R. Nicholls, P. Martens, S. Kovats, M. Livermore, C. Rosenzweig, A. Iglesias et G. Fischer (2001). Millions at Risk: defining critical climate change threats and targets, *Global Environmental Change*, 11, 181-183.
- Parry, M.L. (dir.) (2000). *Assessment of potential effects and adaptations for climate change in Europe: the Europe ACACIA project*, 320 p, Jackson Environment Institute, University of East Anglia, Norwich (UK).
- Pearce, D. (1980). The social incidence of environmental costs and benefits, in *Progress in Resource Management and Environmental Planning*, K.R. Turner (dir.), p 63-88, John Wiley & Sons.
- Peck, S. et T. Teisberg (1993a). Global warming uncertainties and the value of information: an analysis using CETA, *Resources and Energy Economics*, 15 (1), 71-97.
- Peck, S. et T. Teisberg (1993b). The importance of nonlinearities in global warming damage costs, Actes du colloque *Assessing surprises and nonlinearities in greenhouse warming*, M.A. Toman (org.), RFF, Washington D.C., May 1993.
- Peck, S.C. et J.T. Teisberg (1992). CETA: a model for Carbon Emissions Trajectory Assessment, *The Energy Journal*, 13, 55-77.
- Peck, S.C. et J.T. Teisberg (1994). Optimal carbon emissions trajectories when damages depend on the rate or level of global warming, *Climatic Change*, 28, 289-314.
- Peck, S.C. et J.T. Teisberg (1995). Optimal CO₂ control policy with stochastic losses from temperature rise, *Climatic Change*, 31, 19-34.
- Peck, S.C. et J.T. Teisberg (1996). Uncertainty and the value of information with stochastic losses from global warming, *Risk Analysis*, 16 (2), 227-235.
- Petschel-Held, G., H.-J. Schellnhuber, T. Bruckner, F.L. Toth et K. Hasselmann (1999). The Tolerable Windows Approach: theoretical and methodological foundations, *Climatic Change*, 41 (3/4), 303-331.
- Pizer, A.W. (1999). The optimal choice of climate change policy in the presence of uncertainty, *Resources and Energy Economics*, 21, 255-287.
- Plambeck, E.L. et C. Hope (1996). PAGE95: an updated valuation of the impacts of global warming, *Energy Policy*, 24 (9), 783-793.
- Plambeck, E.L., C. Hope et J. Anderson (1997). The PAGE95 model: integrating the science and economics of global warming, *Energy Economics*, 19, 77-101.

- Planton, S. (1999). Incertitudes sur la détermination des changements climatiques, Actes du colloque *Ecole Thématique 'Risques et incertitudes': le cas du changement climatique*, Les Houches (France), 17-22 octobre 1999.
- PNUE/UNEP. *Climate Change Information Sheet*, <http://www.unep.ch/iuc/submenu/infokit/>.
- PNUE/UNEP (1993). *The Toronto and Ottawa conferences and the 'Law of the Atmosphere'*, <http://www.unep.ch/iucc/fs215.html>.
- PNUE/UNEP (2002). *The Asian Brown Cloud: Climate and other Environmental Impacts*, PNUE/UNEP.
- Portney, P.R. et J. Weyant (dir.) (1999). *Discounting and Intergenerational Equity*, 202 p, RFF, Washington D.C.
- Rahmstorf, S. (1997). Risk of sea-change in the Atlantic, *Nature*, 388 (6645), 825-826.
- Rahmstorf, S. (2002). Ocean circulation and climate during the past 120,000 years, *Nature*, 419 (12 September 2002), 207-214.
- Rahmstorf, S. et A. Ganopolski (1999). Long-term global warming scenarios computed with an efficient coupled climate model, *Climatic Change*, 43 (2), 353-367.
- Ramsey, F. (1928). A mathematical theory of saving, *Economic Journal*, 38, 543-559.
- Robyr, J. (2000). Le tourisme de montagne face au changement climatique, Actes du colloque *Les changements climatiques et leurs incidences sur le milieu montagnard*, Chamonix (France), 29-30 juin 2000.
- Root, T.L., J.T. Price, K.R. Hall, S.H. Schneider, C. Rosenzweig et A. Pounds (2003). Fingerprints of global warming on wild animals and plants, *Nature*, 421, 57-60.
- Roqueplo, P. (1988). Expertise scientifique : le cas des pluies acides, *La Recherche* (205).
- Rosenzweig, C. et W.D. Solecki (dir.) (2001). *Climate change and a global city: The potential consequences of climate variability and change - Metro East coast*, 224 p, Columbia Earth Institute, New York (NY).
- Roughgarden, T. et S.H. Schneider (1999). Climate change policy: quantifying uncertainties for damages and optimal control taxes, *Energy Policy*, 27, 415-429.
- Salles, J.-M. (1993). *Décisions économiques et gestion collective des risques globaux d'environnement*, Thèse de doctorat, EHESS.
- Sandweiss, D.H., K.A. Maasch, R.L. Burger, J.B.I. Richardson III, H.B. Rollins et A. Clement (2001). Variation in Holocene El Niño frequencies: Climate records and cultural consequences in ancient Peru, *Geology*, 29 (7), 603-606.
- Savage, L. (1954). *The foundation of Statistics*, Wiley, New York.
- Schaeffer, R., J. Logan, A. Salem Szklo, W. Chandler et J. Gorlos de Souza (2000). *Developping countries and global climate change: electric power option in Brazil*. Pew Center.
- Schelling, T.C. (1992). Some economics of global warming, *American Economic Review*, 82 (1), 1-14.
- Schlesinger, M.E. et N.G. Andronova (2000). Climate sensitivity, in *The Earth system: physical and chemical dimensions of global environmental change*, J.S. Perry (dir.), p 301-308, John Wiley and sons.
- Schmalensee, R. (1972). Option demand and consumer's surplus: valuing price changes under uncertainty, *American Economic Review*, 62, 813-824.
- Schneider, S.H. (2001). What is a 'dangerous' climate change?, *Nature*, 411 (3 May 2001), 17-19.

- Schneider, S.H. (2002). Can we estimate the likelihood of climatic changes at 2100?, *Climatic Change*, 52 (4), 441-451.
- Schneider, S.H., K.K. Duriseti et C. Azar (2000a). Costing Nonlinearities, surprises and irreversible events, *Pacific and Asian Journal of Energy*, 10 (1), 81-91.
- Schneider, S.H., W.E. Easterling et L.O. Mearns (2000b). Adaptation: sensitivity to natural variability, agent assumptions and dynamic climate changes, *Climatic Change*, 45, 203-211.
- Schneider, S.H. et S.L. Thompson (1981). Atmospheric CO₂ and climate: importance of the transient response, *Journal of Geophysical Research*, 86, 3135-3147.
- Scimeni, G. (1987). Environmental strategies and anticipatory strategies, in *Preventive environmental policy*, U.E. Simonis (dir.), Campus, Frankfurt/M. (Germany) & NY.
- Seager, R., D.S. Battisti, J. Yin, N. Gordon, N. Naik, A.C. Clement et M.A. Cane (2002). Is the Gulf Stream responsible for Europe's mild winters?, *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 128, 2563-2586.
- Secrétariat d'Etat au tourisme (2001). Chiffres clefs du tourisme.
- Shaw, M.R., E.S. Zavaleta, N.R. Chiariello, E.E. Cleland, H.A. Mooney et C.B. Field (2002). Grassland Responses to Global Environmental Changes Suppressed by Elevated CO₂, *Science*, 298 (5600), 1987-1990.
- Simonett, O. (1989). *Potential impacts of global warming: cases studies on climatic change*, GRID-Geneva, Geneva (Switzerland).
- Skelly, W.C. et A. Henderson-Sellers (1996). Grid box or grid point: what type of data do GCMs deliver to climate impacts researchers?, *International Journal of Climatology*, 16, 1079-1086.
- Smith, J.B. et S. Hitz (2002). *Estimating global impacts from climate change: Background paper for the OECD/WPGSP project "Benefits of climate policy"*, 94 p, Stratus Consulting Inc., Boulder (CO).
- Solow, R.M. (1956). A contribution to the theory of growth, *Quarterly Journal of Economics*, 70 (1), 65-94.
- Spalding, M.D., C. Ravilious et E.P. Green (2002). *World Atlas of Coral Reefs*, 424 p, University of California Press, Berkeley (CA).
- Spash, C.L. (1994). Double CO₂ and beyond: benefits, costs and compensation, *Ecological Economics*, 10, 27-36.
- Stommel, H. (1961). Thermohaline convection with two stable regimes of flow, *Tellus*, 13, 224-230.
- Summers, R. et A. Heston (1991). The Penn World Table (Mark 5): An expanded set of international comparisons, 1950-1988, *Quarterly Journal of Economics*, 106, 327-368.
- Swan, T.W. (1956). Economic growth and capital accumulation, *Economic Record*, 32, 334-361.
- Swart, R., M. Berk, M. Janssen, E. Kreileman et R. Leemans (1998). The safe landing approach: risks and trade-offs in climate change, in *Global change scenarios of the 21st century: results from the IMAGE 2.1 Model*, E. Kreileman (dir.), p 193-218, Pergamon/Elsevier Science, Oxford (UK).
- Tegart, W.J.M., G.W. Sheldon et D.C. Griffiths (dir.) (1990). *Climate Change-the IPCC Impacts Assessment: Report prepared for IPCC by Working Group II*, Australian Government Publishing Service, Canberra (Au).
- the IMAGE team (2001). *The IMAGE 2.2 implementation of the SRES scenarios*, CDrom.
- the National Academies (2003). *Estimating Climate Sensitivity: Report of a workshop*, 41 p, Steering committee on Probabilistic Estimates of Climate Sensitivity, Board on Atmospheric Sciences and Climate, Division of Earth and Life Studies, the National Academies, Washington D.C.

- Thomas, C.D., A. Cameron, R.E. Green, M. Bakkenes, L.J. Beaumont, Y.C. Collingham, B.F.N. Erasmus, M. Ferreira de Siqueira, A. Grainger, L. Hannah, L. Hughes, B. Huntley, A.S. van Jaarsveld, G.F. Midgley, L. Miles, M.A. Ortega-Huerta, A.T. Peterson, O.L. Phillips et S.E. Williams (2004). Extinction risk from climate change, *Nature*, 427 (8 January 2004 (6970)), 145-148.
- Thompson, L.G., E. Mosley-Thompson, M.E. Davis, K.A. Henderson, H.H. Brecher, V.S. Zagorodnov, T.A. Mashiotta, P.-N. Lin, V.N. Mikhalevko, D.R. Hardy et J. Beer (2002). Kilimanjaro Ice Core Records: Evidence of Holocene Climate Change in Tropical Africa, *Science*, 298, 589-593.
- Titus, J.G. (1992). The cost of Climate Change to the United States, in *Global climate change: Implications challenges and mitigation measures*, L.M. Rosenfeld (dir.), Pennsylvania Academy of Science, Easton (PA).
- Tol, R.S.J. (1995). The Damage Costs of Climate Change: Toward More Comprehensive Calculations, *Environmental and Resource Economics*, 5, 353-374.
- Tol, R.S.J. (1996). The damage costs of climate change towards a dynamic representation, *Ecological Economics*, 19, 67-90.
- Tol, R.S.J. (1997). On the Optimal Control of Carbon Dioxide Emissions: An Application of FUND, *Environmental Modelling and Assessment*, 2, 151-163.
- Tol, R.S.J. (1999a). *New estimates of the damage costs of climate change. Part I: Benchmark estimates*, (report n° D99/01), 29 p. Instituut voor Milieuvraagstukken (IVM), Vrije Universiteit Amsterdam, Amsterdam (the Netherlands).
- Tol, R.S.J. (1999b). *New estimates of the damage costs of climate change. Part II: Dynamic estimates*, (report n° D99/02), 37 p. Instituut voor Milieuvraagstukken (IVM), Vrije Universiteit Amsterdam, Amsterdam (the Netherlands).
- Tol, R.S.J. et H. Dowlatabadi (2002). Vector-borne diseases, Development and Climate change, *Integrated Environmental Assessment*, 2, 173-181.
- Tol, R.S.J. et S. Fankhauser (1997). *On the representation of impact in integrated assessment models of climate change*. IVM, Vrije Universiteit Amsterdam, Amsterdam (the Netherlands).
- Tol, R.S.J., S. Fankhauser, R.G. Richels et J.B. Smith (2000). *How much damage will climate change do? Recent estimates*. Research Unit Sustainability and Global Change, Centre for Marine and Climate Research, Hamburg University, Hamburg (Germany).
- Tol, R.S.J., S. Fankhauser et J.B. Smith (1998). The Scope for Adaptation to Climate Change: What Can We Learn from the Impact Literature?, *Global Environmental Change*, 8 (2), 109-123.
- Toman, M.A. (1998). Why not to calculate the value of the world's ecosystem services and natural capital, *Ecological Economics*, 25 (1), 57-60.
- Toth, F.L., T. Bruckner, H.-M. Füßel, M. Leimbach, G. Petschel-Held et H.-J. Schellnhuber (1997). The tolerable windows approach to integrated assessment, in *Climate Change and Integrated Assessment Models: Bridging the gaps*, T. Morita (dir.), p 401-430, National Institute for Environmental Studies, Tsukuba (Japan).
- Treich, N. (1997). Vers une théorie économique de la précaution ?, *Risques*, 32.
- Treich, N. (2000). Décision séquentielle et Principe de Précaution, *Cahiers d'économie et de sociologie rurales* (55-56), 5-24.
- Tuinstra, W., M. Berk, M. Hisschemöller, L. Hordijk, B. Metz et A.P.J. Mol (2002). *Climate OptiOns for the Long-term (COOL) - Synthesis Report*, Report n° 410 200 115, Wageningen University, Wageningen (the Netherlands).

- Ulph, A. et D. Ulph (1997). Global warming, irreversibility and learning, *The Economic Journal*, 107, 636-650.
- UNFCCC (1992). Convention-cadre des Nations Unies sur les changements climatiques (UNFCCC).
- Vörösmarty, C.J., P. Green, J. Salisbury et R.B. Lammers (2000). Global Water Resources: Vulnerability from climate change and Population Growth, *Science*, 289, 284-288.
- Watson, R.T., I.R. Noble, B. Bolin, N.H. Ravindranath, D.J. Verardo et D.J. Dokken (dir.) (2000). *Land Use, Land-Use Change, and Forestry*, Cambridge University Press, Cambridge (UK).
- Watson, R.T. et the Core Writing Team (dir.) (2001). *Climate change 2001: synthesis report*, 398 p, Cambridge University Press, Cambridge (UK) and New York (NY, USA).
- Watson, R.T., M.C. Zinyowera, R.H. Moss et D.J. Dokken (dir.) (1996). *Climate Change 1995 - Impacts, Adaptations and Mitigation of Climate Change: Contribution of Working Group II to the Second Assessment Report of the IPCC*, Cambridge University Press, Cambridge (UK) & NY(NY).
- Watson, R.T., M.C. Zinyowera, R.H. Moss et D.J. Dokken (dir.) (1998). *The Regional Impacts of Climate Change - An Assessment of Vulnerability: A special report of IPCC Working Group II*, Cambridge University Press, Cambridge (UK) & NY(NY).
- WBGU (1999). *A changing world: Managing global environmental risks (1998 annual report)*, Springer, Berlin (Germany).
- Webster, M. (2002). The Curious Role of "Learning" in Climate Policy: Should We Wait For More Data?, *The Energy Journal*, 23 (2), 97-119.
- Webster, M., C. Forest, J.M. Reilly, M.H. Babiker, D. Kicklighter, M. Mayer, R.G. Prinn, M. Sarofim, A. Sokolov, P. Stone et C. Wang (2002). *Uncertainty analysis of climate change and policy response*, 21 p, MIT report # 95, MIT Joint Program on the Science and Policy of Climate Change, Cambridge (MA).
- Weisbrod, B. (1964). Collective-consumption services of individual-consumption goods, *Quarterly Journal of Economics*, 78, 471-477.
- Weiss, H. et R.S. Bradley (2001). What drives societal collapse?, *Science*, 609-610.
- Weller, G. et M. Lange (1999). *Impacts of global change in the Arctic regions*, International arctic science committee Centre for global change and arctic system research, University of Alaska, Fairbanks (AK).
- Weyant, J. (dir.) (1999). *The costs of the Kyoto Protocol: a multi-model evaluation*, Special Issue of the *Energy Journal* (vol 20).
- Wigley, T.M.L., R. Richels et J.A. Edmonds (1996). Economic and environmental choices in the stabilization of atmospheric CO₂ concentrations, *Nature*, 379, 240-243.
- World Bank (2002a). *Seas, Cities and Storms: Managing Change in Pacific Island Economies*, the World Bank, Washington D.C.
- World Bank (2002b). *World Development Indicators*, the World Bank, Washington D.C.
- WWF (2000). *Global Warming and Terrestrial Biodiversity Decline*, World Wide Fund for Nature (WWF), Gland (Switzerland).
- Yohe, G. (2002). Estimating benefits: Other issues concerning market impacts, Actes du colloque *OECD Workshop on the Benefits of Climate Policy: Improving Information for Policy Makers*, OECD (org.), OECD, Paris, 12-13 dec. 2002.
- Yohe, G.W. et M.E. Schlesinger (1998). Sea-level change: the expected economic cost of protection or abandonment in the United States, *Climatic Change*, 38, 337-342.

Zahn, R. (2003). Monsoon linkages, *Nature*, 421, 325-326.

ANNEXE

Codes des modèles *RESPONSE*

ANNEXE 1 : code du modèle RESPONSE_@ (chapitre IV)

Les 3 codes qui sont donnés ci-après correspondent aux modèles employés au chapitre IV de la thèse : modèles cottefficacité avec des contraintes formulées en termes d'amplitude du réchauffement moyen global et de son rythme décennal d'évolution pour évaluer les politiques climatiques de précaution en présence d'incertitudes.

Politiques climatiques de précaution et incertitude sur la sensibilité du climat (§ IV.1.)

```

$title RESPONSE_Theta: Approche C/E avec contraintes de temperature (amplitude et rythme)
$ontext
* incertitude sur sensibilité du climat
* fonction de cout F leccocq, modele STARTS
* equation de carbone de Nghs (1999)
* eq temp after Nghs (1999) et Schn. & Th (1981), calibrage IPSL
* pour etude selon date arrivee info
$offtext
$offlisting
*coupe la restitution du code ds .lst
$offsyntaxref
*coupe les tables de reference
$offsymlist
*coupe la description des symboles

Sets
t dates du programme /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 date
tlast(t) derniere date
s etat du monde /1, C, H/
date date arrivee info /1990,2000,2010,2020,2030,2040,2050,2060,2070,2080,2090,2100/
;

tfirst(t)=yes$(ord(t) eq 1);
tlast(t)=yes$(ord(t) eq card(t));
alias (s,ss);

Scalars
delta pas de temps (an) /10/
rho taux d'actualisation (%) /0.05/
tinit date initiale /1990/
dateinfo date arrivee info /2300/
tinfo date arrivee info (ordinal)
Budget cout de la politique climatique (pour le fichier de sortie)

* parametres du cout d'abattement
bkstop ct de la backstop (1E3$ par tc)
tarc duree de vie du capital emetteur (ans) /20/
epsilon parametre de l'inertie /0.0001/
tapt taux annuel de penetration du progres technique /0.01/

* parametres du C-cycle
Atmo_PI concentration atmo preindustrielle(1E9 tc)
Atmo_80 concentration atmo 1990 (1E9 tc)
Atmo_ini concentration atmo 1990 (1E9 tc)
Bio_ini concentration biosphere + oc. sup 1990 (1E9 tc)
Oc_ini concentration oc. profond 1990 (1E9 tc)
Ctrans11 Carbon cycle transition matrix
Ctrans12 Carbon cycle transition matrix
Ctrans21 Carbon cycle transition matrix
Ctrans22 Carbon cycle transition matrix
Ctrans31 Carbon cycle transition matrix
Ctrans32 Carbon cycle transition matrix

* parametres des equations de temperature
Tini_sup80 ecart temp moy globale atmo entre 1980 et FI /0.8249988/
Tini_low80 ecart temp moy globale oc entre 1980 et PI /0.3005746/
C1 coeff. transfert /0.4791321/
C2 coeff. transfert /0.1093887/
C3 coeff. transfert /0.1313768/

* contraintes d'evolution du climat
tenseuil seuil max evolution temp /2/
rythmseuil rythme max evolution DECENNALE temp /0.2/
;

tinfo=(dateinfo-tinit)/10+1;
bkstop=1/3;

tarc=1/tarc;
Atmo_PI=280/0.471;
Atmo_80=338.4/0.471;

Parameters
Eb (t) /1990 7.10,
2000 7.97,
2010 10.88,
2020 12.64,
2030 14.48,
2040 15.35,
2050 16.38,
2060 16.00,
2070 15.73,
2080 15.18,
2090 14.30,
2100 13.49,
2110 10,
2120 10,
2130 10,
2140 8,
2150 8,
2160 8,
2170 8,
2180 8,
2190 4,
2200 4,
2210 4,
2220 4,
2230 0,
2240 0,
2250 0,
2260 0,
2270 0,
2280 0,
2290 0,
2300 0/
emissions annuelles en GtC (source:AlM)

* soit 2455 Gtc emises

Lambda(t) facteur de progres technique ct d'abtt
p(s) proba d'occurrence centre /L
*p(s) 0.167, C 0.666, H 0.167/
p*(s) 0.333, C 0.334, H 0.333/
p(s) proba d'occurrence neutre /L
*p(s) 0.666, C 0.167, H 0.167/
p*(s) proba d'occurrence optimiste /L
*p(s) 0.167, C 0.167, H 0.666/
p*(s) proba d'occurrence pessimiste /L
lam(s) facteur retrocontrôle climatique
forc(s) forçage radiatif 2xCO2 /L 3.71, C
temp2x(s) temp2x(s) /L 2.5, C 3.5, H
4.5/ sensibilité du modele

```

```

Tini_sup(s)
Tini_inf(s)
Vartemp(t,s)
Rythme(t,s)
BudgetS(s)
;
ecart temp moy globale atmo entre 1990 et PI
ecart temp moy globale oc entre 1990 et PI
hausse de la temperature (pour le fichier de sortie)
rythme decennal evolution temperature (pour le fichier de sortie)
budget pour chacun des etats du monde (pour le fichier de sortie)
;
Lambda(t)=0.25+0.75*exp(-tapt*delta*(ord(t)-1));
loop(s, lam(s)=forc(s)/temp2x(s));
loop(s, Tini_sup(s)=(1-
C1*(lam(s)+C2))*Tini_sup80+C1*C2*Tini_low80+C1*forc(s)*log(Atmo_80/Atmo_PI)/log(2));
loop(s, Tini_inf(s)=C3*Tini_sup80+(1-C3)*Tini_low80);
*deux fichiers de sortie
file sensclst /neutre202.csv/;
sensclst.pw=500;
sensclst.nd=5;
file sensclst1 /Vineutre202.csv/;
sensclst1.pw=500;
sensclst1.nd=5;
Variables
Atmo(t,s) conc. atmo date t (GtC)
Bio(t,s) conc. biosphere + oc. sup date t (GtC)
Oc(t,s) conc. ocean profond date t (GtC)
T_sup(t,s) augmentation temp. moy. globale atmo.(C)
T_inf(t,s) augmentation temp. moy. globale oc.(C)
a(t,s) niveau d'abattement (GtC)
U critere
;
positive variable Atmo,Bio,Oc,T_sup,T_inf,a;
Atmo.lo(t,s)=Atmo_ini/2;
Atmo.up(t,s)=Atmo_ini*50;
Bio.lo(t,s)=Bio_ini/2;
Bio.up(t,s)=Bio_ini*10;
Oc.lo(t,s)=Oc_ini/2;
Oc.up(t,s)=Oc_ini*2;
T_sup.up(t,s)=15;
T_inf.up(t,s)=15;
a.lo(t,s)=0.00000001;
a.up(t,s)=1;
Atmo.fx(tfirst,s)=Atmo_ini;
Bio.fx(tfirst,s)=Bio_ini;
Oc.fx(tfirst,s)=Oc_ini;
T_sup.fx(tfirst,s)=Tini_sup(s);
T_inf.fx(tfirst,s)=Tini_inf(s);
a.fx(tfirst,s)=0;
Equations
objectif
carbone1(t,s) dynamique Cycle atmo
carbone2(t,s) dynamique Cycle biosphere+oc.
carbone3(t,s) dynamique Cycle oc. profond
tempatmo(t,s) dynamique temperature moy globale atmo
tempoc(t,s) dynamique temperature moy globale oc.
consttemp(t,s) contrainte sur la temperature
constrym(t,s) contrainte sur rythme temperature
constrinfo(t,s,ss) contrainte sur arrivees d'info
;
objectif ..
U=esum((t,s),p(s)*bkstop*Lambda(t)*(1+(a(t,s)-a(t-l,s)-a(t-l,s)-a(t-l,s)-
delta*ta+c)+sqrt((a(t-l,s)-a(t-l,s)-delta*ta+c))*a(t,s)-a(t-l,s)-
delta*ta+c+epsilon))/(2*delta*ta+c))*Eb(t)*(a(t,s)*a(t,s))/(1+rho)**(delta*(ord(t)-
1)));
*pour inertie 0

```

```

*objectif..
U=esum((t,s),p(s)*bkstop*Lambda(t)*Eb(t)*(a(t,s)*a(t,s))/(1+rho)**(delta*(ord(t)-
1)));
carbone1(t,s) .. Atmo(t+1,s)=eCtrans1*Atmo(t,s)+Ctrans12*Bio(t,s)+delta*Eb(t)*(1-
a(t,s));
carbone2(t+1,s) .. Bio(t+1,s)=eCtrans21*Atmo(t,s)+Ctrans22*Bio(t,s)+Ctrans23*Oc(t,s);
carbone3(t+1,s) .. Oc(t+1,s)=eCtrans32*Bio(t,s)+Ctrans33*Oc(t,s);
tempatmo(t+1,s) .. T_sup(t+1,s)=e(1-C1*(lam(s)+C2))*T_sup(t,s)+C1*C2*T_inf(t,s)
+C1*forc(s)*log(Atmo(t,s)/Atmo_PI)/log(2);
tempoc(t+1,s) .. T_inf(t+1,s)=eC3*T_sup(t,s)+(1-C3)*T_inf(t,s);
consttemp(t,s) .. T_sup(t,s)-Tini_sup(s)=l*tempseuil;
constrym(t,s) .. constrym(t,s)-T_sup(t,s)-T_sup(t,s)=l*rythmseuil;
constrinfo(t,s,ss) .. a(t,s)=e*a(t,s,ss);
model RESPONSE /all/;
option solprint=off;
option limcol=0;
option limrow=0;
option sysout=off;
solve RESPONSE using nlp minimizing U;
solve RESPONSE using nlp minimizing U;
solve RESPONSE using nlp minimizing U;
Budget=sum((t,s),p(s)*bkstop*Lambda(t)*(1+(a.1(t,s)-a.1(t-l,s)-delta*ta+c)+sqrt(sqr(a.1(t,s)-
a.1(t-l,s)-delta*ta+c+epsilon))/(2*delta*ta+c))*Eb(t)*(a.1(t,s)**3)/(1+rho)**(delta*(ord(t)-
1)));
* pour inertie 0
*Budget=sum((t,s),p(s)*bkstop*Lambda(t)*Eb(t)*(a.1(t,s)**3)/(1+rho)**(delta*(ord(t)-1)));
Vartemp(t,s)=T_sup.1(t+1,s)-T_sup.1(t,s);
Rythme(t,last,s)=0;
loop(s,
BudgetS(s)=sum(t,bkstop*Lambda(t)*(1+(a.1(t,s)-a.1(t-l,s)-delta*ta+c)+sqrt(sqr(a.1(t,s)-
a.1(t-l,s)-delta*ta+c+epsilon))/(2*delta*ta+c))*Eb(t)*(a.1(t,s)**3)/(1+rho)**(delta*(ord(t)-
1))););
*pour inertie 0
*loop(s,
*BudgetS(s)=sum(t,bkstop*Lambda(t)*Eb(t)*(a.1(t,s)**3)/(1+rho)**(delta*(ord(t)-1))););
pat sensclst;
pat 'Resultats C/E stochastique';;
pat 'tx actu','rho','inertie','ta','c','tsup','tempseuil','RythmeMax','rythmseuil','Date
info','dateinfo','valeur','Budget',;;;
pat 'sens',;
loop(s, put temp2x(s) ',');
pat '/';
pat 'forçage',;
loop(s, put forc(s) ',');
pat '/';
pat 'lambda',;
loop(s, put lam(s) ',');
pat '/';
pat 'proba d''occurrence',;
loop(s, put p(s) ',');
pat '/';
pat 'budget',;
pat loop(s, put BudgetS(s) ',');
pat '/';
pat 'date',;
pat '/';
loop(t, put t.tl ',');
pat '/';
pat 'Atmo',;
loop(s, loop(t, put Atmo.1(t,s) ',') put /);
pat 'Bio',;
loop(s, loop(t,put Bio.1(t,s) ',') put /);
pat 'Oc',;
loop(s, loop(t,put Oc.1(t,s) ',') put /);
pat /;

```

```

put 'T_sup,' ;
loop(s, loop(t,put T_sup.l(t,s) ',') put /;);
put 'T_inf,' ;
loop(s, loop(t,put T_inf.l(t,s) ',') put /;);
put 'abatt,' ;
loop(s, loop(t,put a.l(t,s) ',') put /;);
put 'Eb,' ;
loop(t,put Eb(t) ',');
put 'Delta T,' ;
loop(s, loop(t,put Vartemp(t,s) ',') put /;);
put 'Rythme,' ;
loop(s, loop(t,put Rythme(t,s) ',') put /;);
putclose sensclst;

put sensclst;

put 'Resultats C/F stochastique'//;
put 'tx actu,rho','inertie','tarc','DeltaT','tempseuil','RythmeMax','rythmseuil'//;
put 'sensibilite' ;
loop(s, put temp2x(s) ',') ;
put /;
put 'proba d''occurrence' ;
loop(s, put p(s) ',');
put /;
put 'date info','dateinfo','Valeur','Budget' ;
putclose sensclst;

* boucle sur date arrivee info de 2100--1990 (cert)

loop(date,
tinfo=I3-ord(date);
dateinfo=2100+10*(I-ord(date));
solve RESPONSE using nlp minimizing U;
solve RESPONSE using nlp minimizing U;
solve RESPONSE using nlp minimizing U;

Budget=sum(t,s),p(s)*bkstop*Lambda(t)*(1+((a.l(t,s)-a.l(t-1,s)-delta*tarc)+sqrt(sqr(a.l(t,s)-
l)))));
* pour inertie 0
*Budget=sum(t,s),p(s)*bkstop*Lambda(t)*Eb(t)*(a.l(t,s)**3)/((1+rho)**(delta*(ord(t)-1))););
Vartemp(t,s)=T_sup.l(t,s)-T_inf.l(t,s);
Rythme(t,last,s)=0
loop(s,
Budget(s)=sum(t,bkstop*Lambda(t)*(1+((a.l(t,s)-a.l(t-1,s)-delta*tarc)+sqrt(sqr(a.l(t,s)-
l)))));
* pour inertie 0
*Budget(s)=sum(t,bkstop*Lambda(t)*Eb(t)*(a.l(t,s)**3)/((1+rho)**(delta*(ord(t)-1))))););
sensclst.ap=1;
put sensclst;

put 'dateinfo','dateinfo','Valeur','Budget' //;
put 'proba d''occurrence,' ;
loop(s, put p(s) ',');
put /;

put 'budget,' ;
put loop(s, put Budget(s) ','););
put /;
put 'date,' ;

```

```

put /;
loop(t,put t.tl ',');
put //;
put 'Atmo,' ;
loop(s, loop(t, put Atmo.l(t,s) ',') put /;);
put 'Bio,' ;
loop(s, loop(t,put Bio.l(t,s) ',') put /;);
put 'Oc,' ;
loop(s, loop(t,put Oc.l(t,s) ',') put /;);
put 'T_sup,' ;
loop(s, loop(t,put T_sup.l(t,s) ',') put /;);
put 'T_inf,' ;
loop(s, loop(t,put T_inf.l(t,s) ',') put /;);
put 'abatt,' ;
loop(s, loop(t,put a.l(t,s) ',') put /;);
put 'Eb,' ;
loop(t,put Eb(t) ',');
put 'Delta T,' ;
loop(s, loop(t,put Vartemp(t,s) ',') put /;);
put 'Rythme,' ;
loop(s, loop(t,put Rythme(t,s) ',') put /;);
putclose sensclst;

sensclst.ap=1;
put sensclst;

put 'Date info','dateinfo','Valeur','Budget' ;
put /;
putclose sensclst;

);

Politiques climatiques de précaution et incertitude sur l'amplitude critique du réchauffement moyen global (§ IV.2.)

Sets
t dates du programme /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 date
tlast(t) derniere date
s etat du monde /L,C,H/
date date arrivee info /1990,2000,2010,2020,2030,2040,2050,2060,2070,2080,2090,2100/;

tfirst(t)=yes$(ord(t) eq 1);
tlast(t)=yes$(ord(t) eq card(t));
alias (s,ss);

Scalars
delta pas de temps (an) /10/
rho taux d'actualisation (%) /0.05/
tinit date initiale /1990/
dateinfo date arrivee info /2300/
tinfo date arrivee info (ordinal)

```

```

Budget      cout de la politique climatique (pour le fichier de sortie)
* parametres du cout d'abattement
bkstop      ct de la backstop (IE3$ par tc)
tarc        duree de vie du capital emetteur (ans)
epsillon    parametre de l'inertie
tapt        taux annuel de penetration du progres technique
* parametres du C-cycle
Atmo PI     concentration atmo preindustrielle(1E9 tc)
Atmo 80     concentration atmo 1980 (1E9 tc)
Atmo_ini    concentration atmo 1990 (1E9 tc)
Bio_ini     concentration biosphere + oc. sup 1990 (1E9 tc)
Oc_ini      concentration oc. profond 1990 (1E9 tc)
Ctrans11    Carbon cycle transition matrix
Ctrans21    Carbon cycle transition matrix
Ctrans31    Carbon cycle transition matrix
Ctrans12    Carbon cycle transition matrix
Ctrans22    Carbon cycle transition matrix
Ctrans32    Carbon cycle transition matrix
Ctrans13    Carbon cycle transition matrix
Ctrans23    Carbon cycle transition matrix
Ctrans33    Carbon cycle transition matrix
* parametres des equations de temperature
Tini_sup80  ecart temp moy globale atmo entre 1980 et PI
Tini_low80  ecart temp moy globale oc entre 1980 et PI
lam         facteur retrocontrôle climatique
forc        forçage radiatif 2xCO2
temp2x     sensibilité du modele
Tini_sup    ecart temp moy globale atmo entre 1990 et PI
Tini_inf    ecart temp moy globale oc entre 1990 et PI
C1          coeff. transfert
C2          coeff. transfert
C3          coeff. transfert
* contraintes d'evolution du climat
rythmseuil  rythme max evolution DECENNALE temp
;

tinfo=(dateinfo-tinit)/10+1;
bkstop=1/3;
tarc=1/tarc;
Atmo_PI=280/0.471;
Atmo_80=338.4/0.471;
lam=forc/temp2x;
Tini_sup=(1-C1*(lam+C2))*Tini_sup80+C1*forc*log(Atmo_80/Atmo_PI)/log(2);
Tini_inf=C3*Tini_sup80+(1-C3)*Tini_low80;

Parameters
Eb(t)      /1990 7.10,
           2000 7.97,
           2010 10.88,
           2020 12.64,
           2030 14.48,
           2040 15.35,
           2050 16.38,
           2060 16.00,
           2070 15.73,
           2080 15.18,
           2090 14.30,
           2100 13.49,
           2110 10,
           2120 10,
           2130 10,
           2140 8,
           2150 8,
           2160 8,
           2170 8,
           2180 8,
           2190 4,
           2200 4,
           emissions annuelles en GtC (source:AlM)
;

```

```

2210 4,
2220 4,
2230 0,
2240 0,
2250 0,
2260 0,
2270 0,
2280 0,
2290 0,
2300 0/
* soit 2455 GtC emises
Lambda(t)  facteur de progris technique ct d'abtt /L
*(s)       proba d'occurrence centre /L
0.167,C 0.666,H 0.167/
p(s)       proba d'occurrence neutre /L
0.333,C 0.334,H 0.333/
*(s)       proba d'occurrence optimiste /L
0.666,C 0.167,H 0.167/
*(s)       proba d'occurrence pessimiste /L
0.167,C 0.167,H 0.666/
Vartemp(t,s) hausse de la temperature (pour le fichier de sortie)
Rytime(t,s)  rythme decennal evolution temperature (pour le fichier de sortie)
Budget(s)    budget pour chacun des etats du monde (pour le fichier de sortie)
tempseuil(s) seuil max evolution temp (C) /L 1,C
2,H 3/
;
Lambda(t)=0.25+0.75*exp(-tapt*delta*(ord(t)-1));
*deux fichiers de sortie
file sensclst /neutre0235.csv/;
sensclst.pw=500;
sensclst.nd=5;
file sensclst1 /Vineutre0235.csv/;
sensclst1.pw=500;
sensclst1.nd=5;
Variables
Atmo(t,s)    conc. atmo date t (GtC)
Bio(t,s)     conc. biosphere + oc. sup date t (GtC)
Oc(t,s)      conc. ocean profond date t (GtC)
T_sup(t,s)   augmentation temp. moy. globale atmo.(C)
T_inf(t,s)   augmentation temp. moy. globale oc.(C)
a(t,s)       niveau d'abattement (GtC)
U            critere
;
positive variable Atmo,Bio,Oc,T_sup,T_inf,a;
Atmo.lo(t,s)=Atmo_ini/2;
Atmo.up(t,s)=Atmo_ini*50;
Bio.lo(t,s)=Bio_ini/2;
Bio.up(t,s)=Bio_ini*10;
Oc.lo(t,s)=Oc_ini/2;
Oc.up(t,s)=Oc_ini*2;
T_sup.up(t,s)=15;
T_inf.up(t,s)=15;
a.lo(t,s)=0.00000001;
a.up(t,s)=1;
Atmo.fx(tfirst,s)=Atmo_ini;
Bio.fx(tfirst,s)=Bio_ini;
Oc.fx(tfirst,s)=Oc_ini;
T_sup.fx(tfirst,s)=Tini_sup;
T_inf.fx(tfirst,s)=Tini_inf;
a.fx(tfirst,s)=0;
Equations
objectif    fonction objectif

```

```

carbone1(t,s)
carbone2(t,s)
carbone3(t,s)
tempoc(t,s)
constremp(t,s)
constr1ym(t,s)
constrinfo(t,s,ss)

;

dynamique Ccycle atmo
dynamique Ccycle biosphere+oc. surface
dynamique Ccycle oc. profond
dynamique temperature moy globale atmo
dynamique temperature moy globale oc.
contrainte sur la temperature
constr1ym(t,s)
contrainte sur arrivee d'info

;

U=esum((t,s),p(s)*bktop*Lambda(t)*(1+(a.(t,s)-a.(t-1,s)-
delta*taerc)+sqr((a.(t,s)-a.(t-1,s)-delta*taerc)*(a.(t,s)-a.(t-1,s)-
delta*taerc)+pepsilon))/(2*delta*taerc))*Eb(t)*(a.(t,s)*a.(t,s))/(1+rho)**(delta*(ord(t)-
1)))));
*pour inertie 0
*objectif..
U=esum((t,s),p(s)*bktop*Lambda(t)*Eb(t)*(a.(t,s)*a.(t,s))/(1+rho)**(delta*(ord(t)-
1)))));
carbone1(t+1,s).. Atmo(t+1,s)=e=Ctrans11*Atmo(t,s)+Ctrans12*Bio(t,s)+delta*Eb(t)*(1-
a.(t,s));
carbone2(t+1,s).. Bio(t+1,s)=e=Ctrans21*Atmo(t,s)+Ctrans22*Bio(t,s)+Ctrans23*Oc(t,s);
carbone3(t+1,s).. Oc(t+1,s)=e=Ctrans32*Bio(t,s)+Ctrans33*Oc(t,s);
tempoc(t,s).. T_sup(t+1,s)=e=(1-C1*(lam+C2))*T_sup(t,s)+C1*C2*T_inf(t,s)
+C1*forc*log(Atmo(t,s)/Atmo_PI)/log(2);
tempoc(t+1,s).. T_inf(t+1,s)=e=C3*T_sup(t,s)+(1-C3)*T_inf(t,s);
constremp(t,s).. T_sup(t,s)-Tini_sup=e=Cempeuil(s);
constr1ym(t,s).. T_sup(t+1,s)-T_sup(t,s)=1-rytmeuil;
constrinfo(t,s).. a(t,s)=e=a(t,ss);

model RESPONSE /all/;

option solprint=off;
option limcol=0;
option limrow=0;
option sysout=off;

solve RESPONSE using nlp minimizing U;

Budget=sum((t,s),p(s)*bktop*Lambda(t)*(1+(a.(t,s)-a.(t-1,s)-delta*taerc)+sqr((a.(t,s)-
a.(t-1,s)-delta*taerc)+pepsilon))/(2*delta*taerc))*Eb(t)*(a.(t,s)*a.(t,s))/(1+rho)**(delta*(ord(t)-
1)))));
* pour inertie 0
*Budget=sum((t,s),p(s)*bktop*Lambda(t)*Eb(t)*(a.(t,s)*a.(t,s))/(1+rho)**(delta*(ord(t)-1)))));
Vartemp(t,s)=T_sup.1(t+1,s)-Tini_sup;
Ryhme(t,ss)=T_sup.1(t+1,s)-T_sup.1(t,s);
Ryhme(t,last,s)=0
loop(s,
Budget(s)=sum(t,bktop*Lambda(t)*(1+(a.(t,s)-a.(t-1,s)-delta*taerc)+sqr((a.(t,s)-
a.(t-1,s)-delta*taerc)+pepsilon))/(2*delta*taerc))*Eb(t)*(a.(t,s)*a.(t,s))/(1+rho)**(delta*(ord(t)-
1)))));
* pour inertie 0
*Budget(s)=sum(t,bktop*Lambda(t)*Eb(t)*(a.(t,s)*a.(t,s))/(1+rho)**(delta*(ord(t)-1)))));
* boucle sur date arrivee info de 2100--1990 (cert)

loop(date,
dateinfo=2100+10*(1-ord(date));
solve RESPONSE using nlp minimizing U;

Budget=sum((t,s),p(s)*bktop*Lambda(t)*(1+(a.(t,s)-a.(t-1,s)-delta*taerc)+sqr((a.(t,s)-
a.(t-1,s)-delta*taerc)+pepsilon))/(2*delta*taerc))*Eb(t)*(a.(t,s)*a.(t,s))/(1+rho)**(delta*(ord(t)-
1)))));
* pour inertie 0
*Budget=sum((t,s),p(s)*bktop*Lambda(t)*Eb(t)*(a.(t,s)*a.(t,s))/(1+rho)**(delta*(ord(t)-1)))));

```

```

Vartemp(t,s)=T_sup.1(t,s)-Tini_sup;
Ryhme(t,s)=T_sup.1(t+1,s)-T_sup.1(t,s);
Ryhme(t,last,s)=0
loop(s,
Budget(s)=sum(t,bktop*Lambda(t)*(1+(a.(t,s)-a.(t-1,s)-delta*taerc)+sqr((a.(t,s)-
a.(t-1,s)-delta*taerc)+pepsilon))/(2*delta*taerc))*Eb(t)*(a.(t,s)*a.(t,s))/(1+rho)**(delta*(ord(t)-
1)))));
* pour inertie 0
*loop(s,
*Budget(s)=sum(t,bktop*Lambda(t)*Eb(t)*(a.(t,s)*a.(t,s))/(1+rho)**(delta*(ord(t)-1)))));
);

;

Sets
t dates du programme /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 date
tlast(t) derniere date
s etat du monde /I,C,H/;
date date arrivee info /1990,2000,2010,2020,2030,2040,2050,2060,2070,2080,2090,2100/;

tfirst(t)=yes$(ord(t) eq 1);
tlast(t)=yes$(ord(t) eq card(t));
alias (s,ss);

Scalars
delta pas de temps (an) /10/
rho taux d'actualisation (%) /0.05/
tinit date initiale /1990/
dateinfo date arrivee info /2300/
tinfo date arrivee info (ordinal)
Budget cout de la politique climatique (pour le fichier de sortie)
* parametres du cout d'abattement
bktop ct de la bckstop (IE3$ par tc) /20/
taerc duree de vie du capital emetteur (ans) /0.0001/
epsilon parametre de l'inertie /0.01/
tapt taux annuel de penetration du progres technique
* parametres du C-cycle
Atmo_PI concentration atmo preindustrielle (IE9 tc)
Atmo_80 concentration atmo 1990 (IE9 tc) /758.19133/
Atmo_ini concentration biosphere + oc. sup 1990 (IE9 tc) /792.59567/
Bio_ini concentration oc. profond 1990 (IE9 tc) /19230/
Oc_ini Carbon cycle transition matrix /0.66616/
Ctrans11 Carbon cycle transition matrix /0.33384/
Ctrans21 Carbon cycle transition matrix /0/
Ctrans31 Carbon cycle transition matrix /0.27607/
Ctrans12 Carbon cycle transition matrix /0.60897/
Ctrans22 Carbon cycle transition matrix /0.11496/
Ctrans32 Carbon cycle transition matrix /0/
Ctrans13 Carbon cycle transition matrix /0.00422/
Ctrans23 Carbon cycle transition matrix /0.99578/
Ctrans33 Carbon cycle transition matrix
* parametres des equations de temperature
Tini_sup80 ecart temp moy globale atmo entre 1980 et 1900 /0.8249988/
Tini_low80 ecart temp moy globale oc entre 1980 et 1900 /0.3005746/
lam facteur retrocontrôle climatique
forc forçage radiatif 2xCO2 /3.71/
sensibilite du modele /3.5/
Tini_sup ecart temp moy globale atmo entre 1990 et PI
Tini_inf ecart temp moy globale oc entre 1990 et PI
Cl coeff. transfert /0.4791321/

```

```

C2      coeff. transfert      /0.1093887/
C3      coeff. transfert      /0.1313768/
*      * contraintes d'evolution du climat      /2/
tempseuil      seuil max evolution temp (C)

;

tinfo=(dateinfo-tinit)/10+1;
bkstop=1/3;
tarc=1/tarc;
Atmo.PI=280/0.471;
Atmo_80=338.4/0.471;
lamsforc/temp2x;
Tini_sup=(1-C1*(lamC2))*Tini_sup80+C1*C2*Tini_low80+Cl*forc*log(Atmo_80/Atmo.PI)/log(2);
Tini_inf=C3*Tini_sup80+(1-C3)*Tini_low80;

Parameters
Eb(t)      /1990      7.10,
           /2000      7.97,
           /2010      10.88,
           /2020      12.64,
           /2030      14.48,
           /2040      15.35,
           /2050      16.38,
           /2060      16.00,
           /2070      15.73,
           /2080      15.18,
           /2090      14.30,
           /2100      13.49,
           /2110      10,
           /2120      10,
           /2130      10,
           /2140      8,
           /2150      8,
           /2160      8,
           /2170      8,
           /2180      8,
           /2190      4,
           /2200      4,
           /2210      4,
           /2220      4,
           /2230      0,
           /2240      0,
           /2250      0,
           /2260      0,
           /2270      0,
           /2280      0,
           /2290      0,
           /2300      0/
*      * soit 2455 Gtc emises

Lambda(t)      facteur de progres technique ct d'abtt      /L
*p(s)          proba d'occurrence centre      /L
p(s)          proba d'occurrence neutre      /L
*p(s)          proba d'occurrence optimiste      /L
*p(s)          proba d'occurrence pessimiste      /L
0.167,C 0.167,H 0.666/
0.167,C 0.167,H 0.666/
Vartemp(t,s)  hausse de la temperature (pour le fichier de sortie)
Rythme(t,s)   rythme decennal evolution temperature (pour le fichier de sortie)
Budgets(s)    budget pour chacun des etats du monde (pour le fichier de sortie)
Rythmseuil(s) rythme max evolution DECENTRALE temp      /L 0.1,
              C 0.2, H 0.3/
;

Lambda(t)=0.25+0.75*exp(-tapt*delta*(ord(t)-1));
*deux fichiers de sortie
file sensclst/Neutre235.csv/;
sensclst.pw=500;

```

```

sensclst.nd=5;
file sensclst1/VIneutre235.csv/;
sensclst1.pw=500;
sensclst1.nd=5;

Variables
Atmo(t,s)      conc. atmo date t (Gtc)
Bio(t,s)       conc. biosphere + oc. sup date t (Gtc)
Oc(t,s)        conc. ocean profond date t (Gtc)
T_sup(t,s)     augmentation temp. moy. globale atmo.(C)
T_inf(t,s)     augmentation temp. moy. globale oc.(C)
a(t,s)         niveau d'abattement (Gtc)
U              citeete

positive variable Atmo,Bio,Oc,T_sup,T_inf,a;

Atmo.lo(t,s)=Atmo_ini/2;
Atmo.up(t,s)=Atmo_ini*50;
Bio.lo(t,s)=Bio_ini/2;
Bio.up(t,s)=Bio_ini*10;
Oc.lo(t,s)=Oc_ini/2;
Oc.up(t,s)=Oc_ini*2;
T_sup.up(t,s)=15;
T_inf.up(t,s)=15;
a.lo(t,s)=0.00000001;
a.up(t,s)=1;

Atmo.fx(tfirst,s)=Atmo_ini;
Bio.fx(tfirst,s)=Bio_ini;
Oc.fx(tfirst,s)=Oc_ini;
T_sup.fx(tfirst,s)=Tini_sup;
T_inf.fx(tfirst,s)=Tini_inf;
a.fx(tfirst,s)=0;

Equations
objectif      fonction objectif
carbone1(t,s) dynamique Cycle atmo
carbone2(t,s) dynamique Cycle biosphere+oc. surface
carbone3(t,s) dynamique Cycle oc. profond
tempatmo(t,s) dynamique temperature moy globale atmo
tempoc(t,s)   dynamique temperature moy globale oc.
constrtemp(t,s) contrainte sur la temperature
constrrytm(t,s) contrainte sur rythme temperature
constrinfo(t,s,ss) contrainte sur arrivee d'info

;

objectif ..      U=e-sum(t,s),p(s)*bkstop*Lambda(t)*(1+(a(t,s)-a(t-l,s)-
delta*tarc)+sqrt(sqr(a(t,s)-a(t-l,s)-
delta*tarc)+epsilon))/(2*delta*tarc))*Eb(t)*(a(t,s)**3)/((1+rho)**(delta*(ord(t)-1))));
*pour inertie 0
*objectif..
U=e-sum(t,s),p(s)*bkstop*Lambda(t)*Eb(t)*(a(t,s)*a(t,s)*a(t,s))/((1+rho)**(delta*(ord(t)-
1))));
carbone1(t+1,s)..      Atmo(t+1,s)=e=Ctrans11*Atmo(t,s)+Ctrans12*Bio(t,s)+delta*Eb(t)*(1-
a(t,s));
carbone2(t+1,s)..      Bio(t+1,s)=e=Ctrans21*Atmo(t,s)+Ctrans22*Bio(t,s)+Ctrans23*Oc(t,s);
carbone3(t+1,s)..      Oc(t+1,s)=e=Ctrans32*Bio(t,s)+Ctrans33*Oc(t,s);
tempatmo(t+1,s)..      T_sup(t+1,s)=e=(1-C1*(lamC2))*T_sup(t,s)+C1-C2*T_inf(t,s)
+C1*forc*log(Atmo(t,s)/Atmo_PI)/log(2);
tempoc(t+1,s)..      T_inf(t+1,s)=e=C3*T_sup(t,s)+(1-C3)*T_inf(t,s);
constrtemp(t,s)..      constrtemp(t,s)$(ord(t)>2)..
constrrytm(t,s)..      T_sup(t+1,s)-T_sup(t,s)=l=rythmseuil(s);
constrinfo(t,s,ss)$(ord(t)<=tinfo)..      a(t,s)=e=a(t,ss);

model RESPONSE /all/;
option solprint=off;

```

```

option limcol=0;
option limrow=0;
option sysout=off;

solve RESPONSE using nlp minimizing U;

Budget=sum((t,s),p(s)*bkstop*Lambda(t)*(1+(a.1(t,s)-a.1(t-1,s)-delta*taerc)+sqr((a.1(t,s)-
a.1(t-1,s)-delta*taerc)+epsilon)))/(2*delta*taerc)*Eb(t)*(a.1(t,s)**3)/((1+rho)**(delta*(ord(t)-
1)))));
* pour inertie 0
*Budget=sum((t,s),p(s)*bkstop*Lambda(t)*Eb(t)*(a.1(t,s)**3)/((1+rho)**(delta*(ord(t)-1)))));
Vartemp(t,s)=T_sup.1(t,s)-T_inf.sup;
Rythme(t,s)=T_sup.1(t+1,s)-T_sup.1(t,s);
Rythme(t,laet,s)=0
loop(s,
BudgetS(s)=sum(t,bkstop*Lambda(t)*(1+(a.1(t,s)-a.1(t-1,s)-delta*taerc)+sqr((a.1(t,s)-
a.1(t-1,s)-delta*taerc)+epsilon)))/(2*delta*taerc)*Eb(t)*(a.1(t,s)**3)/((1+rho)**(delta*(ord(t)-
1)))));
* pour inertie 0
*loop(s,
*BudgetS(s)=sum(t,bkstop*Lambda(t)*Eb(t)*(a.1(t,s)**3)/((1+rho)**(delta*(ord(t)-1)))));

* boucle sur date arrivee info de 2100--1990 (cert)
loop(date,
tinfo=13-ord(date);
dateinfo=2100+10*(1-ord(date));
solve RESPONSE using nlp minimizing U;

Budget=sum((t,s),p(s)*bkstop*Lambda(t)*(1+(a.1(t,s)-a.1(t-1,s)-delta*taerc)+sqr((a.1(t,s)-
a.1(t-1,s)-delta*taerc)+epsilon)))/(2*delta*taerc)*Eb(t)*(a.1(t,s)**3)/((1+rho)**(delta*(ord(t)-
1)))));
* pour inertie 0
*Budget=sum((t,s),p(s)*bkstop*Lambda(t)*Eb(t)*(a.1(t,s)**3)/((1+rho)**(delta*(ord(t)-1)))));
Vartemp(t,s)=T_sup.1(t,s)-T_inf.sup;
Rythme(t,s)=T_sup.1(t+1,s)-T_sup.1(t,s);
Rythme(t,laet,s)=0
loop(s,
BudgetS(s)=sum(t,bkstop*Lambda(t)*(1+(a.1(t,s)-a.1(t-1,s)-delta*taerc)+sqr((a.1(t,s)-
a.1(t-1,s)-delta*taerc)+epsilon)))/(2*delta*taerc)*Eb(t)*(a.1(t,s)**3)/((1+rho)**(delta*(ord(t)-
1)))));
* pour inertie 0
*loop(s,
*BudgetS(s)=sum(t,bkstop*Lambda(t)*Eb(t)*(a.1(t,s)**3)/((1+rho)**(delta*(ord(t)-1)))));

);

```

ANNEXE 2 : code du modèle RESPONSE_II (chapitre V)

Les 4 codes qui sont donnés ci-après correspondent aux modèles employés au chapitre V de la thèse : modèles coût-bénéfice en présence d'une 'Préférence pour la stabilité du climat' pour évaluer les politiques climatiques de précaution en contexte incertain.

Politiques climatiques de précaution en présence d'une 'Préférence pour la stabilité du climat' (§ II.)

```

$title RESPONSE.PI: Approche C/B avec fonction d'utilite (consommation et climat)
* pour sensibilité du cal sur theta sur resultats optimaux en certain
* incertitude sur sensibilité du climat
* fonction de coût Fiteccq, modele STARTS
* equation de carbone de Ndhs (1999)
* eq temp after Ndhs (1999) et Schn. & Th (1981), calibrage IPSL
* source Alm
* pour etude selon date arrivee info sur WTP/sens. cli.

Sets
t dates du programme /1990,2000,2010,2020,2030,2040,2050,2060,2070,2080,2090,2100,
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 date
tlast(t) derniere date
date date arrivee info /1990,2000,2010,2020,2030,2040,2050,2060,2070,2080,2090,2100/
s etat du monde /L,C,H/

tfirst(t)=yes$(ord(t) eq 1);
tlast(t)=yes$(ord(t) eq card(t));
alias (s,ss);

Scalars
delta pas de temps (an) /10/
prp preference pure pour present (%) /0.03/
tinit date initiale /1990/
dateinfo date arrivee info /2300/
tinfo date d'arrivee info (ordinal)
Budget valeur de l'objectif espere (VI) pour le fichier de sortie

* parametres du cout d'abattement
bkstop ct de la backstop (IE$ par ct) /20/
tarc taux annuel de renouvellement du capital emetteur /0.0001/
epsilon parametre de l'inertie /0.01/
tapt taux annuel de penetration du progres technique

*parametres de la fonction d'utilite
theta variation maximale de temp (C) /4/
cons propension a consommer /0.8/

* parametres du C-cycle
Atmo.PI concentration atmo preindustrielle(IE9 tc)
Atmo.80 concentration atmo 1990 (IE9 tc)
Atmo.ini concentration atmo 1990 (IE9 tc)
Bo.ini concentration biosphere + oc. sup 1990 (IE9 tc)
Oc.ini concentration oc. profond 1990 (IE9 tc)
Ctrans11 Carbon cycle transition matrix /758.19133/
Ctrans12 Carbon cycle transition matrix /792.59567/
Ctrans13 Carbon cycle transition matrix /19230/
Ctrans14 Carbon cycle transition matrix /0.66616/
Ctrans15 Carbon cycle transition matrix /0.33384/
Ctrans16 Carbon cycle transition matrix /0/
Ctrans17 Carbon cycle transition matrix /0.27607/
Ctrans18 Carbon cycle transition matrix /0.60897/
Ctrans19 Carbon cycle transition matrix /0.11496/
Ctrans20 Carbon cycle transition matrix /0/
Ctrans21 Carbon cycle transition matrix /0.00422/
Ctrans22 Carbon cycle transition matrix /0.99578/
Ctrans23 Carbon cycle transition matrix
Ctrans33

```

```

* parametres des equations de temperature
Tini_sup80 ecart temp moy globale atmo entre 1980 et 1900 /0.8249988/
Tini_low80 ecart temp moy globale oc entre 1980 et 1900 /0.3005746/
C1 coeff. transfert /0.4791321/
C2 coeff. transfert /0.1093887/
C3 coeff. transfert /0.1313768/

```

```

;
tinfo=(dateinfo-tinit)/delta+1;
bkstop=1/3;
tarc=1/tarc;
Atmo.PI=280/0.471;
Atmo.80=338.4/0.471;

```

```

Parameters
Eb(t) /1990 7.10,
2000 7.97,
2010 10.88,
2020 12.64,
2030 14.48,
2040 15.35,
2050 16.38,
2060 16.00,
2070 15.73,
2080 15.18,
2090 14.30,
2100 13.49,
2110 12.26,
2120 10.79,
2130 8.95,
2140 6.80,
2150 4.65,
2160 2.76,
2170 1.35,
2180 0.51,
2190 0.13,
2200 0.02,
2210 0,
2220 0,
2230 0,
2240 0,
2250 0,
2260 0,
2270 0,
2280 0,
2290 0,
2300 0/
emissions annuelles en GtC (source:Alm)

```

```

*soit 2077 GtC emises
Pib(t) /1990 20.9,
2000 26.7,
2010 37.9,
2020 56.5,
2030 89.1,
2040 127.1,
2050 181.3,
2060 235.1,
2070 304.7,
2080 377.4,
2090 446.6,
2100 528.5,
2110 616.8,
2120 713.5,
2130 845.7,
2140 1029.5,
2150 1246.3,
2160 1501.9,
2170 1802.8,
2180 2156.7,
2190 2572.8,
PIB mondial en IE12 US90$ (source:Alm)

```

```

2200 3061.8,
2210 3636.3,
2220 4311.0,
2230 5103.3,
2240 6033.7,
2250 7126.0,
2260 8408.6,
2270 9914.3,
2280 11682.0,
2290 13757.3,
2300 16193.6/

Pop(t) /1990 5262,
2000 6117,
2010 6805,
2020 7493,
2030 8182,
2040 8439,
2050 8704,
2060 8538,
2070 8375,
2080 8030,
2090 7528,
2100 7056,
2110 6615,
2120 6201,
2130 6000,
2140 6000,
2150 6000,
2160 6000,
2170 6000,
2180 6000,
2190 6000,
2200 6000,
2210 6000,
2220 6000,
2230 6000,
2240 6000,
2250 6000,
2260 6000,
2270 6000,
2280 6000,
2290 6000,
2300 6000/

Population mondiale en million hb (source: ALM)

facteur de progres technique ct d'abtt
parametre d'actualisation
*****
*theta=3
*beta(s) exposant qualite environnement (pbt=1%) /L 0.0000855,C 0.0003904,H 0.0006569/
*beta(s) exposant qualite environnement (pbt=3%) /L 0.0001699,C 0.0009441,H 0.0018554/
*theta=4
*beta(s) exposant qualite environnement (pbt=1%) /L 0.0001623,C 0.0007551,H 0.0012795/
*beta(s) exposant qualite environnement (pbt=3%) /L 0.0003061,C 0.0017827,H 0.0035449/
*theta=5
*beta(s) exposant qualite environnement (pbt=1%) /L 0.0002384,C 0.0011173,H 0.0018985/
*beta(s) exposant qualite environnement (pbt=3%) /L 0.0004437,C 0.0026096,H 0.005216/

p(s) proba d'occurrence centre /L 0.167,C 0.666,H 0.167/
*p(s) proba d'occurrence neutre /L 0.333,C 0.334,H 0.333/
*beta(s) proba d'occurrence optimiste /L 0.666,C 0.167,H 0.167/
*beta(s) proba d'occurrence pessimiste /L 0.167,C 0.167,H 0.666/
*****

facteur retrocontrôle climatique
forçage radiatif 2XCO2 /L 3.71,C 3.71,H 3.71/
sensibilité du modèle /L 2.5,C 3.5,H 4.5/
ecart temp moy globale atmo entre 1990 et PI
ecart temp moy globale oc entre 1990 et PI
hausse de la temperature
rythme decennal evolution temperature

BudgetS(s)

```

```

Cout (t,s) couts pour chacun des etats du monde
Ecumcal(s) emissions cumulees jusqu'en 2220
;

Lambda(t)=0.25+0.75*exp(-tapt*delta*(ord(t)-1));
disc(t)=exp(-ptp*delta*(ord(t)-1));
loop(s, lam(s)=forc(s)/temp2x(s));
loop(s, Tini_sup(s)=(1-
CI*(lam(s)+C2))*Tini_sup80+C1*C2*Tini_low80+C1*forc(s)*log(Atmo_80/Atmo_PI)/log(2));
loop(s, Tini_inf(s)=C3*Tini_sup80+(1-C3)*Tini_low80);

*deux fichiers de sortie
file sensclst/PCCRcentre34.csv/;
sensclst.pw=500;
sensclst.nd=5;

file sensclst/VIPCCRcentre34.csv/;
sensclst.pw=500;
sensclst.nd=5;

Variables
Atmo(t,s) conc. atmo date t (GtC)
Bio(t,s) conc. biosphere + oc. sup date t (GtC)
Oc(t,s) conc. ocean profond date t (GtC)
T_sup(t,s) augmentation temp. moy. globale atmo. (C)
T_inf(t,s) augmentation temp. moy. globale oc. (C)
a(t,s) niveau d'abattement (GtC)
0 critere
;

positive variable Atmo,Bio,Oc,T_sup,T_inf,a,cumEb;

Atmo.lo(t,s)=Atmo_ini/2;
Atmo.up(t,s)=Atmo_ini*50;
Bio.lo(t,s)=Bio_ini/2;
Bio.up(t,s)=Bio_ini*10;
Oc.lo(t,s)=Oc_ini/2;
Oc.up(t,s)=Oc_ini*2;
T_sup.up(t,s)=theta*Tini_sup(s);
T_inf.up(t,s)=theta*Tini_sup(s);
a.lo(t,s)=0.00000001;
a.up(t,s)=1;

Atmo.fx(tfirst,s)=Atmo_ini;
Bio.fx(tfirst,s)=Bio_ini;
Oc.fx(tfirst,s)=Oc_ini;
T_sup.fx(tfirst,s)=Tini_sup(s);
T_inf.fx(tfirst,s)=Tini_inf(s);
a.fx(tfirst,s)=0;

Equations
objectif fonction objectif
carbone1(t,s) dynamique Cycle atmo
carbone2(t,s) dynamique Cycle biosphere+oc. surface
carbone3(t,s) dynamique Cycle oc. profond
tempatmo(t,s) dynamique temperature moy globale atmo
tempoc(t,s) dynamique temperature moy globale oc.
constrinfo(t,s,s) contrainte sur arrivee d'info
;

objectif .. U=e-sum((t,s),p(s)*
Pop(t)*log(cons*1000000*(Fib(t)-bkstop*Lambda(t)*(1+((a(t,s)-a(t-1,s)-
delta*taoc)+sqrt((a(t,s)-a(t-1,s)-delta*taoc)*a(t,s)-a(t-1,s)-
delta*taoc)+epsilon))/(2*delta*taoc))*Eb(t)*(a(t,s)*a(t,s)*a(t,s)))/Pop(t))
*(theta-T_sup(t,s)+Tini_sup(s))*beta(s))*disc(t));
* pour inertie nulle
*objectif .. U=e-sum((t,s),p(s)*
* Pop(t)*log(cons*1000000*(Pib(t)-bkstop*Lambda(t)*Eb(t)*(a(t,s)*a(t,s)*a(t,s))/Pop(t))

```

```

* ((theta_T_sup(t,s)+Tini_sup(s))*beta(s))*disc(t));
carbonel(t+1,s) .. Atmo(t+1,s)=cctrans11*Atmo(t,s)+Ctrans12*Bio(t,s)+Ctrans23*Oc(t,s)+(1-
a(t,s));
carbonez(t+1,s) .. Bio(t+1,s)=Ctrans21*Atmo(t,s)+Ctrans22*Bio(t,s)+Ctrans23*Oc(t,s);
carbonez3(t+1,s) .. Oc(t+1,s)=Ctrans32*Bio(t,s)+Ctrans33*Oc(t,s);
tempatmo(t+1,s) .. T_sup(t+1,s)=e=(1-C1)*(lam(s)+C2)*T_sup(t,s)+C1*C2*T_inf(t,s)
+C1*forc(s)*log(Atmo(t,s)/Atmo_Pi)/log(2);
tempoc(t+1,s) .. T_inf(t+1,s)=e=C3*T_sup(t,s)+(1-C3)*T_inf(t,s);
constrinfo(t,s,s$(ord(t)<tinfo)) ..
_a(t,s)=e=a(t,s,s);

model RESPPCCR /all/;
option solprint=off;
option limcoj=0;
option limrow=0;
option sysout=off;

solve RESPPCCR using nlp maximizing U;

Vartemp(t,s)=T_sup.1(t+1,s)-T_sup.1(t,s);
Rythme(t,s)=T_sup.1(t+1,s)-T_sup.1(t,s);
Rythme(t,last,s)=0;
loop(s);
Budgets(s) = sum(t,Pop(t) *
log(cons*IE6*(Eib(t)-bkstop*Lambda(t)*(1+((a.1(t,s)-a.1(t-1,s)-delta*ta*rc)+sqr((sqr(a.1(t,s)-
a.1(t-1,s)-delta*ta*rc)+epsilon)))/(2*delta*ta*rc))*Eb(t)*(a.1(t,s)**3))/Pop(t))
*( (theta_T_sup.1(t,s)+Tini_sup(s))*beta(s))*disc(t)
);
* pour inertie 0
* loop(s);
* Budgets(s) = sum(t,Pop(t) *
*log(cons*100000*(Eib(t)-bkstop*Lambda(t)*Eb(t)*(a(t,s)*a(t,s)*a(t,s))/Pop(t))
*( (theta_T_sup(t,s)+Tini_sup(s))*beta(s))*disc(t)
);
* Cout(t,s)=bkstop*Lambda(t)*(1+((a.1(t,s)-a.1(t-1,s)-delta*ta*rc)+sqr((sqr(a.1(t,s)-a.1(t-1,s)-
delta*ta*rc)+epsilon)))/(2*delta*ta*rc))*Eb(t)*(a.1(t,s)**3);
* pour inertie 0
* Cout(t,s)=bkstop*Lambda(t)*Eb(t)*(a.1(t,s)**3);
Budget=sum(s,p(s)*Budgets(s));
Ecumcal(s)=sum(t,delta*Eb(t)*(1-a.1(t,s)));

* boucle sur date arrivee info de 2100--1990 (cert)
loop(date);
tinfo=13-ord(date);
dateinfo=2100+10*(1-ord(date));
solve RESPPCCR using nlp maximizing U;

Vartemp(t,s)=T_sup.1(t,s)-Tini_sup(s);
Rythme(t,s)=T_sup.1(t+1,s)-T_sup.1(t,s);
Rythme(t,last,s)=0;
loop(s);
Budgets(s) = sum(t,Pop(t) *
log(cons*IE6*(Eib(t)-bkstop*Lambda(t)*(1+((a.1(t,s)-a.1(t-1,s)-delta*ta*rc)+sqr((sqr(a.1(t,s)-
a.1(t-1,s)-delta*ta*rc)+epsilon)))/(2*delta*ta*rc))*Eb(t)*(a.1(t,s)**3))/Pop(t))
*( (theta_T_sup.1(t,s)+Tini_sup(s))*beta(s))*disc(t)
);
* pour inertie 0
* loop(s);
* Budgets(s) = sum(t,Pop(t) *
*log(cons*100000*(Eib(t)-bkstop*Lambda(t)*Eb(t)*(a(t,s)*a(t,s)*a(t,s))/Pop(t))
*( (theta_T_sup(t,s)+Tini_sup(s))*beta(s))*disc(t)
);
* Cout(t,s)=bkstop*Lambda(t)*(1+((a.1(t,s)-a.1(t-1,s)-delta*ta*rc)+sqr((sqr(a.1(t,s)-a.1(t-1,s)-
delta*ta*rc)+epsilon)))/(2*delta*ta*rc))*Eb(t)*(a.1(t,s)**3);
* pour inertie 0
* Cout(t,s)=bkstop*Lambda(t)*Eb(t)*(a.1(t,s)**3);
Budget=sum(s,p(s)*Budgets(s));
Ecumcal(s)=sum(t,delta*Eb(t)*(1-a.1(t,s)));
);

```

Politiques climatiques de précaution et incertitude sur la sensibilité du climat (§ III.1.)

\$title RESPONSE_Pi: Approche C/B avec fonction d'utilite (consommation et climat)
* incertitude sur sensibilité du climat pour etude selon date arrivee info sur sens. cli.

Sets

t dates du programme /1990,2000,2010,2020,2030,2040,2050,2060,2070,2080,2090,2100/
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 date
tlast(t) dernière date
s date arrivee info /1990,2000,2010,2020,2030,2040,2050,2060,2070,2080,2090,2100/
etat du monde /L,C,H/

tfirst(t)=yes\$(ord(t) eq 1);

tlast(t)=yes\$(ord(t) eq card(t));

alias (s,ss);

Scalars

delta pas de temps (an) /10/

ppp preference pure pour present (%) /0.03/

tinit date initiale /1990/

dateinfo date arrivee info /2300/

tinfo date d'arrivee info (ordinal)

Budget valeur de l'objectif espere (VI) pour le fichier de sortie

* parametres du cout d'abattement

bkstop ct de la bkstop (IE3\$ par tc) /20/

ta*rc taux annuel de renouvellement du capital emetteur /0.0001/

epsilon parametre de l'inertie /0.01/

ta*pt taux annuel de penetration du progres technique

*parametres de la fonction d'utilite

theta variation maximale de temp (C) /4/

cons propension a consommer /0.8/

* parametres du C-cycle

Atmo_Pi concentration atmo preindustrielle (IE9 tc)

Atmo_80 concentration atmo 1980 (IE9 tc) /758.19133/

Atmo_ini concentration atmo 1990 (IE9 tc) /792.59567/

Bio_ini concentration biosphere + oc. sup 1990 (IE9 tc) /19230/

Oc_ini concentration oc. profond 1990 (IE9 tc) /0.66616/

Ctrans11 Carbon cycle transition matrix /0.33384/

Ctrans21 Carbon cycle transition matrix /0.27607/

Ctrans31 Carbon cycle transition matrix /0.60897/

Ctrans12 Carbon cycle transition matrix /0.27607/

Ctrans22 Carbon cycle transition matrix /0.60897/

Ctrans32 Carbon cycle transition matrix /0.11496/

Ctrans13 Carbon cycle transition matrix /0.00422/

Ctrans23 Carbon cycle transition matrix /0.99578/

Ctrans33 Carbon cycle transition matrix

* parametres des equations de temperature

Tini_sup80 ecart temp moy globale atmo entre 1980 et 1900 /0.8249988/

Tini_low80 ecart temp moy globale oc entre 1980 et 1900 /0.3005746/

C1 coeff. transfert /0.4791321/

C2 coeff. transfert /0.1093887/

C3 coeff. transfert /0.1313768/

* ;

tinfo=(dateinfo-tinit)/delta+1;

bkstop=1/3;

ta*rc=1/ta*rc;

Atmo_Pi=280/0.471;

Atmo_80=338.4/0.471;

* ;

```

Parameters
Eb (t) /1990 7.10,
2000 7.97,
2010 10.88,
2020 12.64,
2030 14.48,
2040 15.35,
2050 16.38,
2060 16.00,
2070 15.73,
2080 15.18,
2090 14.30,
2100 13.49,
2110 12.46,
2120 10.79,
2130 8.95,
2140 6.80,
2150 4.65,
2160 2.76,
2170 1.35,
2180 0.51,
2190 0.13,
2200 0.02,
2210 0,
2220 0,
2230 0,
2240 0,
2250 0,
2260 0,
2270 0,
2280 0,
2290 0,
2300 0,
*soit 2077 GtC emises

Pib(t) /1990 20.9,
2000 26.7,
2010 37.9,
2020 56.5,
2030 89.1,
2040 127.1,
2050 181.3,
2060 235.1,
2070 304.7,
2080 377.4,
2090 446.6,
2100 528.5,
2110 616.8,
2120 713.5,
2130 845.7,
2140 1029.5,
2150 1246.3,
2160 1501.9,
2170 1802.8,
2180 2156.7,
2190 2572.8,
2200 3061.8,
2210 3636.3,
2220 4311.0,
2230 5103.3,
2240 6033.7,
2250 7126.0,
2260 8408.6,
2270 9914.3,
2280 11682.0,
2290 13757.3,
2300 16193.6/

emissions annuelles en GtC (source:Alm)

Population mondiale en million hb (source: Alm)
/1990 5262,
2000 6117,
2010 6805,
2020 7493,

```

```

2030 8182,
2040 8439,
2050 8704,
2060 8538,
2070 8375,
2080 8030,
2090 7528,
2100 7056,
2110 6615,
2120 6201,
2130 6000,
2140 6000,
2150 6000,
2160 6000,
2170 6000,
2180 6000,
2190 6000,
2200 6000,
2210 6000,
2220 6000,
2230 6000,
2240 6000,
2250 6000,
2260 6000,
2270 6000,
2280 6000,
2290 6000,
2300 6000/

Lambda(t) facteur de progres technique ct d'abtt
disc(t) parametre d'actualisation
*****
*p(s) proba d'occurrence neutre /L 0.167,C 0.666,H 0.167/
*p(s) proba d'occurrence neutre /L 0.333,C 0.334,H 0.333/
*p(s) proba d'occurrence optimiste /L 0.666,C 0.167,H 0.167/
*p(s) proba d'occurrence pessimiste /L 0.167,C 0.167,H 0.666/
*****
*theta=4
*beta(s) exposant qualite environnement (ppt=1%) /L 0.0007551,C 0.0007551,H 0.0007551/
beta(s) exposant qualite environnement (ppt=3%) /L 0.0017827,C 0.0017827,H 0.0017827/
lam(s) facteur retrocontrôle climatique
forc(s) /L 3.71,C 3.71,H 3.71/
temp2x(s) /L 2.5,C 3.5,H 4.5/
Tini_sup(s)
Tini_inf(s)
Vartemp(t,s) hausse de la temperature
Ryhme(t,s) rythme decennal evolution temperature
Ecumcal(s) emissions cumulees jusqu'en 2220
Emette(t,s) emissions CO.2 nettes (apres politique)
BudgetS(s) budget pour chacun des etats du monde
Cout (t,s) couts pour chacun des etats du monde
;

Lambda(t)=0.25+0.75*exp(-tapt*delta*(ord(t)-1));
disc(t)=exp(-ptp*delta*(ord(t)-1));
loop(s, lam(s)=forc(s)/temp2x(s));
loop(s,Tini_sup(s)=(1-
CI*(lam(s)+C2))*Tini_sup80+C1*Tini_low80+CI*forc(s)*log(Atmo_80/Atmo_PI)/log(2));
loop(s,Tini_inf(s)=C3*Tini_sup80+(1-C3)*Tini_low80);
*deux fichiers de sortie
file sensclst/PCCRpessi34.csv/;
sensclst.pw=500;
sensclst.nd=5;
file sensclst1/VIFCCRpessi34.csv/;
sensclst1.pw=500;
sensclst1.nd=5;

Variables
Atmo(t,s) conc. atmo date t (GtC)
Bio(t,s) conc. biosphere + oc. sup date t (GtC)

```

```

Oc(t,s)
T_sup(t,s)
T_inf(t,s)
a(t,s)
U
;

positive variable Atmo,Bio,OC,T_sup,T_inf,a;

Atmo.lo(t,s)=Atmo_ini/2;
Atmo.up(t,s)=Atmo_ini*50;
Bio.lo(t,s)=Bio_ini/2;
Bio.up(t,s)=Bio_ini*10;
OC.lo(t,s)=OC_ini/2;
OC.up(t,s)=OC_ini*2;
T_sup.up(t,s)=thea*mini_sup(s);
T_inf.up(t,s)=thea*mini_sup(s);
a.lo(t,s)=0.00000001;
a.up(t,s)=1;

Atmo.fx(tfirst,s)=Atmo_ini;
Bio.fx(tfirst,s)=Bio_ini;
OC.fx(tfirst,s)=OC_ini;
T_sup.fx(tfirst,s)=Tini_sup(s);
T_inf.fx(tfirst,s)=Tini_inf(s);
a.fx(tfirst,s)=0;

Equations
objectif fonction objectif
carbone1(t,s) dynamique Cycle atmo
carbone2(t,s) dynamique Cycle biosphere+oc. surface
carbone3(t,s) dynamique Cycle oc. profond
tempatmo(t,s) dynamique temperature moy globale atmo
tempoc(t,s) dynamique temperature moy globale oc.
constrinfo(t,s,ss) contrainte sur arrivee d'info

;

objectif ..
U=SUM(t,s),p(s) *
Pop(t)*log(cons*IE6*(Pib(t)-bkstop*Lambda(t)*(1+((a.l(t,s)-a(t,s)-a(t-l,s)-
delta*ta*rc)+epsilon)/(2*delta*ta*rc))*Eb(t)*(a(t,s)-a(t-l,s)-
delta*ta*rc)+epsilon)/(2*delta*ta*rc))*beta(s))*disc(t));
*(theta-T_sup(t,s)+Tini_sup(s))*beta(s))*disc(t));
* pour inertie nulle
*objectif ..
U=SUM(t,s),p(s) *
Pop(t)*log(cons*1000000*(Pib(t)-bkstop*Lambda(t)*Eb(t)*(a(t,s)*a(t,s))*a(t,s)))/Pop(t)
* ((theta-T_sup(t,s)+Tini_sup(s))*beta(s))*disc(t));
* ((theta-T_sup(t,s)+Tini_sup(s))*beta(s))*disc(t));
carbone1(t,l,s) ..
Atmo(t+l,s)=eCtrans11*Atmo(t,s)+Ctrans12*Bio(t,s)+Ctrans13*OC(t,s)+delta*Eb(t)*(1-
a(t,s));
carbone2(t+l,s) ..
Bio(t+l,s)=eCtrans21*Atmo(t,s)+Ctrans22*Bio(t,s)+Ctrans23*OC(t,s);
carbone3(t+l,s) ..
OC(t+l,s)=eCtrans32*Bio(t,s)+Ctrans33*OC(t,s);
tempatmo(t+l,s) ..
T_sup(t+l,s)=e=(1-C1)*(lam(s)+C2)+T_sup(t,s)+C1*C2*T_inf(t,s)
+C1*forc(s)*log(Atmo(t,s)/Atmo_PI)/log(2);
tempoc(t+l,s) ..
T_inf(t+l,s)=e=C3*T_sup(t,s)+(1-C3)*T_inf(t,s);
constrinfo(t,s,ss){ord(t)<tinfo..
_a(t,s)=e=a(t,s,ss);
model RESPONSE /all/;

option solprint=off;
option limcoq=0;
option limrow=0;
option sysout=off;

solve RESPFCCR using nlp maximizing U;

Vartemp(t,s)=T_sup.l(t,s)-Tini_sup(s);
Rytime(t,s)=T_sup.l(t+l,s)-T_sup.l(t,s);
Rytime(tlast,s)=0;

```

```

loop(s)
Budgets(s)=sum(t,Pop(t)*
log(cons*IE6*(Pib(t)-bkstop*Lambda(t)*(1+((a.l(t,s)-a.l(t-l,s)-delta*ta*rc)+sqr(t(sqr(a.l(t,s)-
a.l(t-l,s)-delta*ta*rc)+epsilon)/(2*delta*ta*rc))*Eb(t)*(a.l(t,s)**3))/Pop(t))
*(theta-T_sup.l(t,s)+Tini_sup(s))*beta(s))*disc(t)
);
* pour inertie 0
* loop(s)
* Budgets(s)=sum(t,Pop(t)*
*log(cons*1000000*(Pib(t)-bkstop*Lambda(t)*Eb(t)*(a(t,s)*a(t,s))*a(t,s)))/Pop(t))
**((theta-T_sup(t,s)+Tini_sup(s))*beta(s))*disc(t))
);
Cont(t,s)=bkstop*Lambda(t)*(1+((a.l(t,s)-a.l(t-l,s)-delta*ta*rc)+sqr(t(sqr(a.l(t,s)-a.l(t-l,s)-
delta*ta*rc)+epsilon)/(2*delta*ta*rc))*Eb(t)*(a.l(t,s)**3);
* pour inertie 0
*Cont(t,s)=bkstop*Lambda(t)*Eb(t)*(a.l(t,s)**3);
Budget=sum(s,p(s)*Budgets(s));
Ecumcal(s)=sum(t,delta*Eb(t)*(1-a.l(t,s)));
Emette(t,s)=Eb(t)*(1-a.l(t,s));

* boucle sur date arrivee info de 2100--1990 (cert)

loop(date,
tinfo=13-ord(date);
dateinfo=2100+10*(1-ord(date));
solve RESPFCCR using nlp maximizing U;
solve RESPFCCR using nlp maximizing U;
solve RESPFCCR using nlp maximizing U;
Vartemp(t,s)=T_sup.l(t,s)-Tini_sup(s);
Rytime(t,s)=T_sup.l(t+l,s)-T_sup.l(t,s);
Rytime(tlast,s)=0;
loop(s)
BudgetS(s)=sum(t,Pop(t)*
log(cons*IE6*(Pib(t)-bkstop*Lambda(t)*(1+((a.l(t,s)-a.l(t-l,s)-delta*ta*rc)+sqr(t(sqr(a.l(t,s)-
a.l(t-l,s)-delta*ta*rc)+epsilon)/(2*delta*ta*rc))*Eb(t)*(a.l(t,s)**3))/Pop(t))
*(theta-T_sup.l(t,s)+Tini_sup(s))*beta(s))*disc(t)
);
* pour inertie 0
* loop(s)
* BudgetS(s)=sum(t,Pop(t)*
*log(cons*1000000*(Pib(t)-bkstop*Lambda(t)*Eb(t)*(a(t,s)*a(t,s))*a(t,s)))/Pop(t))
**((theta-T_sup(t,s)+Tini_sup(s))*beta(s))*disc(t)
);
Cont(t,s)=bkstop*Lambda(t)*(1+((a.l(t,s)-a.l(t-l,s)-delta*ta*rc)+sqr(t(sqr(a.l(t,s)-a.l(t-l,s)-
delta*ta*rc)+epsilon)/(2*delta*ta*rc))*Eb(t)*(a.l(t,s)**3);
* pour inertie 0
*Cont(t,s)=bkstop*Lambda(t)*Eb(t)*(a.l(t,s)**3);
Budget=sum(s,p(s)*BudgetS(s));
Ecumcal(s)=sum(t,delta*Eb(t)*(1-a.l(t,s)));
Emette(t,s)=Eb(t)*(1-a.l(t,s));

t dates du programme /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 date
tlast(t) derniere date
date date arrivee info /1990,2000,2010,2020,2030,2040,2050,2060,2070,2080,2090,2100/
s etat du monde /l,C,H/

```

Politiques climatiques de précaution et croyances sur les risques climatiques (§ III.2.)

Stitle RESPONSE_Pi: Approche C/B avec fonction d'utilite (consommation et climat)
* incertitude sur sensibilité du climat pour etude selon date arrivee info sur WIP

Sets

```

t dates du programme /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 date
tlast(t) derniere date
date date arrivee info /1990,2000,2010,2020,2030,2040,2050,2060,2070,2080,2090,2100/
s etat du monde /l,C,H/

```

```

;
tfirst(t)=yes$(ord(t) eq 1);
tlast(t)=yes$(ord(t) eq card(t));
alias (s,ss);

Scalars
delta /10/
pdp /0.03/
tinit /1990/
dateinfo /2300/
tinfo
Budget
* parametres du cout d'abattement
bkstop ct de la backstop (IE9 par tc) /20/
tarc taux annuel de renouvellement du capital emetteur /0.0001/
epsilon parametre de l'inertie /0.01/
tapt taux annuel de penetration du progres technique /0.01/
*
*parametres de la fonction d'utilite
theta variation maximale de temp (C) /4/
cons propension a consommer /0.8/
*
* parametres du C-cycle
Atmo_PI concentration atmo preindustrielle(IE9 tc)
Atmo_80 concentration atmo 1990 (IE9 tc) /758.19133/
Atmo_191 concentration atmo 1990 (IE9 tc) /792.59567/
Bio_191 concentration biosphere + oc. sup 1990 (IE9 tc) /19230/
Oc_191 concentration oc. profond 1990 (IE9 tc) /0.66616/
Trans11 Carbon cycle transition matrix /0.33384/
Trans21 Carbon cycle transition matrix /0/
Trans31 Carbon cycle transition matrix /0/
Trans12 Carbon cycle transition matrix /0.27607/
Trans22 Carbon cycle transition matrix /0.60897/
Trans32 Carbon cycle transition matrix /0.11496/
Trans13 Carbon cycle transition matrix /0/
Trans23 Carbon cycle transition matrix /0.00422/
Trans33 Carbon cycle transition matrix /0.99578/
*
* parametres des equations de temperature
Tini_sup80 ecart temp moy globale atmo entre 1980 et 1990 /0.8249988/
Tini_low80 ecart temp moy globale oc entre 1980 et 1990 /0.3005746/
C1 coeff. transfert /0.4791321/
C2 coeff. transfert /0.1093887/
C3 coeff. transfert /0.1313768/
lam facteur retrocontrôle climatique /3.71/
forc forçage radiatif 2xCO2 /3.5/
temp2x sensibilité du modele
Tini_sup ecart temp moy globale atmo entre 1990 et PI
Tini_inf ecart temp moy globale oc entre 1990 et PI
*
;

tinfo=(dateinfo-tinit)/delta+1;
bkstop=1/3;
tarc=1/tarc;
Atmo_PI=280/0.471;
Atmo_80=338.4/0.471;
lam=forc/temp2x;
Tini_sup=(1-C1*(lam+C2))*Tini_sup80+C1*forc*log(Atmo_80/Atmo_PI)/log(2);
Tini_inf=C3*Tini_sup80+(1-C3)*Tini_low80;

Parameters
Eb(t) /1990 7.10,
2000 7.97,
2010 10.88,
2020 12.64,
2030 14.48,
emissions annuelles en GtC (source:AlM)

Population mondiale en million hb (source: AlM)
/1990 5262,
2000 6117,
2010 6805,
2020 7493,
2030 8182,
2040 8439,
2050 8704,
2060 8538,
2070 8375,
2080 8030,
2090 7528,
2100 7056,
2040 15.35,
2050 16.38,
2060 16.00,
2070 15.73,
2080 15.18,
2090 14.30,
2100 13.49,
2110 12.26,
2120 10.79,
2130 8.95,
2140 6.80,
2150 4.65,
2160 2.76,
2170 1.35,
2180 0.51,
2190 0.13,
2200 0.02,
2210 0,
2220 0,
2230 0,
2240 0,
2250 0,
2260 0,
2270 0,
2280 0,
2290 0,
2300 0/
*soit 2077 GtC émises

Fib(t) /1990 20.9,
2000 26.7,
2010 37.9,
2020 56.5,
2030 89.1,
2040 127.1,
2050 181.3,
2060 235.1,
2070 304.7,
2080 377.4,
2090 446.6,
2100 528.5,
2110 616.8,
2120 713.5,
2130 845.7,
2140 1029.5,
2150 1246.3,
2160 1501.9,
2170 1802.8,
2180 2156.7,
2190 2572.8,
2200 3061.8,
2210 3636.3,
2220 4311.0,
2230 5103.3,
2240 6033.7,
2250 7126.0,
2260 8408.6,
2270 9914.3,
2280 11682.0,
2290 13757.3,
2300 16183.6/

FIB mondial en IE12 US90$ (source:AlM)

```

```

6615,
2110
6201,
2120
6000,
2130
6000,
2140
6000,
2150
6000,
2160
6000,
2170
6000,
2180
6000,
2190
6000,
2200
6000,
2210
6000,
2220
6000,
2230
6000,
2240
6000,
2250
6000,
2260
6000,
2270
6000,
2280
6000,
2290
6000,
2300
6000/

Lambda(t)      facteur de progres technique ct d'abtt
disc(t)         parametre d'actualisation
*****
*theta=4
beta(s) exposant qualite environnement (ppt=3%) /L 0.0125114,C 0.0017827,H 0.0000813/
*****
*p(s)          proba d'occurrence centre /L 0.167,C 0.666,H 0.167/
*p(s)          proba d'occurrence neutre /L 0.333,C 0.334,H 0.333/
*p(s)          proba d'occurrence optimiste /L 0.666,C 0.167,H 0.167/
p(s)          proba d'occurrence pessimiste /L 0.167,C 0.167,H 0.666/
*****
Vartemp(t,s)  hausse de la temperature
Rythme(t,s)   rythme decennal evolution temperature
BudgetS(s)    budget pour chacun des etats du monde
Cout(t,s)     couts pour chacun des etats du monde
Ecumcal(s)    emissions cumulees jusqu'en 2220
;

Lambda(t)=0.25+0.75*exp(-t*ptp*delta*(ord(t)-1));
disc(t)=exp(-t*ptp*delta*(ord(t)-1));

Variables
  Atmo(t,s)    conc. atmo date t (GtC)
  Bio(t,s)     conc. biosphere + oc. sup date t (GtC)
  Oc(t,s)      conc. ocean profond date t (GtC)
  T_sup(t,s)   augmentation temp. moy. globale atmo.(C)
  T_inf(t,s)   niveau d'abatement (GtC)
  a(t,s)       critere
;

positive variable Atmo,Bio,Oc,T_sup,T_inf,a,cumBb;

Atmo_lo(t,s)=Atmo_ini/2;
Atmo_up(t,s)=Atmo_ini*50;
Bio_lo(t,s)=Bio_ini/2;
Bio_up(t,s)=Bio_ini*10;
Oc_lo(t,s)=Oc_ini/2;
Oc_up(t,s)=Oc_ini*2;
T_sup_up(t,s)=theta*Tini_sup;
T_inf_up(t,s)=theta*Tini_sup;
a_lo(t,s)=0.00000001;
a_up(t,s)=1;

Atmo.fx(tfirst,s)=Atmo_ini;
Bio.fx(tfirst,s)=Bio_ini;
Oc.fx(tfirst,s)=Oc_ini;
T_sup.fx(tfirst,s)=Tini_sup;
T_inf.fx(tfirst,s)=Tini_inf;

```

```

a.fx(tfirst,s)=0;

Equations
  objectif      fonction objectif
  carbone1(t,s) dynamique Cycle atmo
  carbone2(t,s) dynamique Cycle biosphere+oc. surface
  carbone3(t,s) dynamique Cycle oc. profond
  tempatmo(t,s) dynamique Temperature moy globale atmo
  tempoc(t,s)   dynamique Temperature moy globale oc.
  constrinfo(t,s,ss) contrainte sur arrivee d'info
;

objectif ..
  U=e-sum(t,s),p(s)*
  Pop(t)*log(cons*1000000*(Pib(t)-bkstop*Lambda(t)*(1+((a(t,s)-a(t-1,s)-
  delta*ta+c)+sqrt((a(t,s)-a(t-1,s)-delta*ta+c)*(a(t,s)-a(t-1,s)-
  delta*ta+c)+epsilon))/(2*delta*ta+c))*Eb(t)*(a(t,s)*a(t,s)*a(t,s)))/Pop(t))
  *((theta-T_sup(t,s)+Tini_sup)**beta(s))*disc(t));
* pour inertie nulle
*objectif ..
  U=e-sum(t,s),p(s)*
  * Pop(t)*log(cons*1000000*(Pib(t)-bkstop*Lambda(t)*Eb(t)*(a(t,s)*a(t,s)))/Pop(t))
  * ((theta-T_sup(t,s)+Tini_sup)**beta(s))*disc(t));
  carbone1(t+1,s)..
  Atmo(t+1,s)=eCtrans11*Atmo(t,s)+Ctrans12*Bio(t,s)+delta*Eb(t)*(1-
  at(t,s));
  carbone2(t+1,s)..
  Bio(t+1,s)=eCtrans21*Atmo(t,s)+Ctrans22*Bio(t,s)+Ctrans23*Oc(t,s);
  carbone3(t+1,s)..
  Oc(t+1,s)=eCtrans32*Bio(t,s)+Ctrans33*Oc(t,s);
  tempatmo(t+1,s)..
  T_sup(t+1,s)=e(1-C1*(Lam+C2))*T_sup(t,s)+C1*C2*T_inf(t,s)
  +C1*forc*log(Atmo(t,s)/Atmo_PI)/log(2);
  tempoc(t+1,s)..
  T_inf(t+1,s)=eC3*T_sup(t,s)+(1-C3)*T_inf(t,s);
  constrinfo(t,s,ss){ord(t)<=tinfo}..
  _a(t,s)=e*a(t,s,ss);

model RESPPCCR /all/;

option solprint=off;
option limcol=0;
option limrow=0;
option sysout=off;

solve RESPPCCR using nlp maximizing U;

Vartemp(t,s)=T_sup.1(t,s)-Tini_sup;
Rythme(t,s)=T_sup.1(t+1,s)-T_sup.1(t,s);
Rythme(tlast,s)=0;
loop(s);
BudgetS(s)= sum(t,Pop(t)*
log(cons*1E6*(Pib(t)-bkstop*Lambda(t)*(1+((a.1(t,s)-a.1(t-1,s)-delta*ta+c)+sqrt(sqr(a.1(t,s)-
a.1(t-1,s)-delta*ta+c)+epsilon))/(2*delta*ta+c))*Eb(t)*(a.1(t,s)**3))/Pop(t))
*((theta-T_sup.1(t,s)+Tini_sup)**beta(s))*disc(t))
);
* pour inertie 0
* BudgetS(s) = sum(t,Pop(t)*
*log(cons*1000000*(Pib(t)-bkstop*Lambda(t)*Eb(t)*(a(t,s)*a(t,s)))/Pop(t))
** ((theta-T_sup(t,s)+Tini_sup)**beta(s))*disc(t))
);
Cout(t,s)=bkstop*Lambda(t)*(1+((a.1(t,s)-a.1(t-1,s)-delta*ta+c)+sqrt(sqr(a.1(t,s)-a.1(t-1,s)-
delta*ta+c)+epsilon))/(2*delta*ta+c))*Eb(t)*(a.1(t,s)**3);
* pour inertie 0
* Cout(t,s)=bkstop*Lambda(t)*Eb(t)*(a.1(t,s)**3);
Budget-sum(s, p(s)*BudgetS(s));
Ecumcal(s)=sum(t,delta*Eb(t)*(1-a.1(t,s)));
* boucle sur date arrivee info de 2100--1990 (cert)

loop(date,
tinfo=13-ord(date);
dateinfo=2100+10*(1-ord(date));
solve RESPPCCR using nlp maximizing U;
solve RESPPCCR using nlp maximizing U;
solve RESPPCCR using nlp maximizing U;

```

```

solve RESPFCCCE using nlp maximizing U;

Vartemp(t,s)=T_sup.1(t,s)-Tini_sup;
Rythme(t,s)=T_sup.1(t+1,s)-T_sup.1(t,s);
Rythme(t,last,s)=0;
loop(s,
  BudgetS(s)= sum(t,Pop(t)*
    log(cons*IE6*(PIb(t)-bkstop*Iambda(t)*(1+(a.1(t,s)-a.1(t-1,s)-delta*tarc)+sqr(sqr(a.1(t,s)-
    a.1(t-1,s)-delta*tarc)+epsilon)))/(2*delta*tarc))*Eb(t)*(a.1(t,s)**3))/Pop(t))
  *( (theta-T_sup.1(t,s)+Tini_sup)**beta(s))*disc(t)
);
* pour inertie 0
* loop(s)
*BudgetS(s)= sum(t,Pop(t)*
*log(cons*100000*(PIb(t)-bkstop*Iambda(t)*Eb(t)*(a(t,s)*a(t,s)*a(t,s)))/Pop(t))
**((theta-T_sup(t,s)+Tini_sup)**beta(s))*disc(t)
);
Cout(t,s)=bkstop*Iambda(t)*(1+(a.1(t,s)-a.1(t-1,s)-delta*tarc)+sqr(sqr(a.1(t,s)-a.1(t-1,s)-
delta*tarc)+epsilon)))/(2*delta*tarc))*Eb(t)*(a.1(t,s)**3);
* pour inertie 0
*Cout(t,s)=bkstop*Iambda(t)*Eb(t)*(a.1(t,s)**3);
Budget=sum(s, p(s)*BudgetS(s));
Ecumcal(s)=sum(t,delta*Eb(t)*(1-a.1(t,s)));
);

```

Politiques climatiques de précaution et catégories d'impacts du changement climatique (§ IV.)

\$ttitle RESPONSE_Pi: Approche C/B avec fonction d'utilite (consommation et climat)

*pour etudier substituabilite dommage entre cons. et climat en certain

Sets

t dates du programme /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 date
tlast(t) derniere date

indice pour le calibrage /Osizieme*6sizieme/

* indices=0 tout sur l'environnement, indice=1 tout sur la cons

boucle(indice) pour la boucle sur les resultats du calibrage /Osizieme*5sizieme/

;

tfirst(t)=yes\$(ord(t) eq 1);

tlast(t)=yes\$(ord(t) eq card(t));

;

Scalars

delta pas de temps (an) /10/

ptp preference pure pour present (%) /0.03/

Budget valeur de l'objectif -- pour le fichier de sortie

Ecumcal emissions cumulees jusqu'en 2220 -- pour le fichier de sortie

* parametres du cout d'abattement

bkstop ct de la backstop (IE3\$ par tc)

tarc taux annuel de renouvellement du capital emetteur /20/

epsilon parametre de l'inertie /0.0001/

tapt taux annuel de penetration du progres technique /0.01/

* parametres de la fonction d'utilite

theta variation maximale de temp (C) /4/

beta elasticite climat

cons propension a consommer /0.8/

* parametres de la fonction de dommages

nu exposant

alpha coefficient d'echelle (% du revenu disponible)

*

```

* parametres du C-cycle
Atmo_Pi concentration atmo preindustrielle(IE9 tc)
Atmo_80 concentration atmo 1980 (IE9 tc)
Atmo_191 concentration atmo 1990 (IE9 tc)
Bio_ini concentration biosphere + oc. sup 1990 (IE9 tc)
Oc_ini concentration oc. profond 1990 (IE9 tc)
Ctrans11 Carbon cycle transition matrix
Ctrans12 Carbon cycle transition matrix
Ctrans13 Carbon cycle transition matrix
Ctrans14 Carbon cycle transition matrix
Ctrans15 Carbon cycle transition matrix
Ctrans16 Carbon cycle transition matrix
Ctrans17 Carbon cycle transition matrix
Ctrans18 Carbon cycle transition matrix
Ctrans19 Carbon cycle transition matrix
Ctrans20 Carbon cycle transition matrix
Ctrans21 Carbon cycle transition matrix
Ctrans22 Carbon cycle transition matrix
Ctrans23 Carbon cycle transition matrix
Ctrans24 Carbon cycle transition matrix
Ctrans25 Carbon cycle transition matrix
Ctrans26 Carbon cycle transition matrix
Ctrans27 Carbon cycle transition matrix
Ctrans28 Carbon cycle transition matrix
Ctrans29 Carbon cycle transition matrix
Ctrans30 Carbon cycle transition matrix
Ctrans31 Carbon cycle transition matrix
Ctrans32 Carbon cycle transition matrix
Ctrans33 Carbon cycle transition matrix
*
* parametres des equations de temperature
Tini_sup80 ecart temp moy globale atmo entre 1980 et 1900 /0.8249988/
Tini_low80 ecart temp moy globale oc entre 1980 et 1900 /0.3005746/
C1 coeff. transfert /0.4791321/
C2 coeff. transfert /0.33384/
C3 coeff. transfert /0.66616/
lam facteur retrocontrôle climatique /0.27607/
forc forçage radiatif 2xCO2 /0.60897/
temp2x sensibilité du modele /0.11496/
Tini_sup ecart temp moy globale atmo entre 1990 et PI /0.00422/
Tini_inf ecart temp moy globale oc entre 1990 et PI /0.99578/
*
;
bkstop=1/3;
tarc=1/tarc;
Atmo_Pi=280/0.471;
Atmo_80=338.4/0.471;
lam=forc/temp2x;
Tini_sup=(1-C1*(lam+C2))*Tini_sup80+C1*forc*Log(Atmo_80/Atmo_Pi)/log(2);
Tini_inf=C3*Tini_sup80+(1-C3)*Tini_low80;

```

Parameters

Eb(t) emissions annuelles en GtC (source:AIM)

/1990	7.10,
2000	7.97,
2010	10.88,
2020	12.64,
2030	14.48,
2040	15.35,
2050	16.38,
2060	16.00,
2070	15.73,
2080	15.18,
2090	14.30,
2100	13.49,
2110	12.26,
2120	10.79,
2130	8.95,
2140	6.80,
2150	4.65,
2160	2.76,
2170	1.35,
2180	0.51,
2190	0.13,
2200	0.02,
2210	0,
2220	0,
2230	0,
2240	0,
2250	0,
2260	0,
2270	0,
2280	0,
2290	0,
2300	0,
*soit 2077	GTC emises

FIB mondial en IE12 US90\$ (source:Alm)

```

Fib(t) /1990 20.9,
2000 26.7,
2010 37.9,
2020 56.5,
2030 89.1,
2040 127.1,
2050 181.3,
2060 235.1,
2070 304.7,
2080 377.4,
2090 446.6,
2100 528.5,
2110 616.8,
2120 845.7,
2130 1029.5,
2140 1246.3,
2150 1501.9,
2160 1802.8,
2170 2156.7,
2180 2572.8,
2190 3061.8,
2200 3636.3,
2210 4311.0,
2220 5103.3,
2230 6033.7,
2240 7126.0,
2250 8408.6,
2260 9914.3,
2270 11682.0,
2280 13757.3,
2290 16183.6/

```

Population mondiale en million hb (source: ALM)

```

Pop(t) /1990 5262,
2000 6117,
2010 6805,
2020 7493,
2030 8182,
2040 8439,
2050 8538,
2060 8375,
2070 8030,
2080 7528,
2090 7056,
2100 6615,
2120 6201,
2130 6000,
2140 6000,
2150 6000,
2160 6000,
2170 6000,
2180 6000,
2190 6000,
2200 6000,
2210 6000,
2220 6000,
2230 6000,
2240 6000,
2250 6000,
2260 6000,
2270 6000,
2280 6000,
2290 6000,
2300 6000/

```

```

pour 2C donne 2%
cal_alpha(indice)      resultats calibrage pour alpha
/0sizieme              0,
1sizieme               0.0034,
2sizieme               0.0066,
3sizieme               0.01,
4sizieme               0.0134,

```

```

5sizieme               0.0166,
6sizieme               0.02/

cal_beta(indice)      resultats du calibrage pour beta
/0sizieme              0.0029176,
1sizieme               0.0024261,
2sizieme               0.0019619,
3sizieme               0.0014669,
4sizieme               0.00097,
5sizieme               0.0005006,
6sizieme               0/

Lambda(t)             facteur de progres technique ct d'abtt
disc(t)                parametre d'actualisation
Vartemp(t)            hausse de la temperature
Rytime(t)             rythme decennal evolution temperature
Cout(t)              couts pour chacun des etats du monde
Emnette(t)           trajectoire emissions
;

Lambda(t)=0.25+0.75*exp(-tapt*delta*(ord(t)-1));
disc(t)=exp(-ptp*delta*(ord(t)-1));

Variables

Atmo(t)               conc. atmo date t (GtC)
Bio(t)                conc. biosphere + oc. sup date t (GtC)
Oc(t)                 conc. ocean profond date t (GtC)
T_sup(t)              augmentation temp. moy. globale atmo.(C)
T_inf(t)              augmentation temp. moy. globale oc.(C)
a(t)                  niveau d'abattement (GtC)
U                     critere

positive variable Atmo,Bio,Oc,T_sup,T_inf,a;

Atmo_lo(t)=Atmo_ini/2;
Atmo_up(t)=Atmo_ini*50;
Bio_lo(t)=Bio_ini/2;
Bio_up(t)=Bio_ini*10;
Oc_lo(t)=Oc_ini/2;
Oc_up(t)=Oc_ini*2;
T_sup.up(t)=theta+Tini_sup;
T_inf.up(t)=theta+Tini_inf;
a_lo(t)=0.00000001;
a_up(t)=1;

Atmo_fx(tfirst)=Atmo_ini;
Bio_fx(tfirst)=Bio_ini;
Oc_fx(tfirst)=Oc_ini;
T_sup.fx(tfirst)=Tini_sup;
T_inf.fx(tfirst)=Tini_inf;
a_fx(tfirst)=0;

Equations

objectif              fonction objectif
obj_null              fonction objectif gd PCCR nulle
carbonel(t)          dynamique Ccycle atmo
carbon2(t)            dynamique Ccycle biosphere+oc. surface
carbon3(t)            dynamique Ccycle oc. profond
tempatmo(t)          dynamique temperature moy globale atmo
tempoc(t)             dynamique temperature moy globale oc.

objectif ..          U=e=sum(t,
Pop(t)*log(const*1000000*(Fib(t)*(1-alpha)^power((T_sup(t)-Tini_sup),nu)) -
bkstop*Lambda(t)*(1+(a(t)-a(t-1)-delta*tarc)+sqrt((a(t)-a(t-1)-delta*tarc)*(a(t)-a(t-1)-
delta*tarc)+epsilon)))/(2*delta*tarc))*Eb(t)*a(t)*a(t))/Pop(t))

```

```

* ((theta-T_sup(t)+Tini_sup)**beta)*disc(t));
obj_null ..
U=esum(t,
Pop(t)*Log(const*1000000*(Fib(t)*(1-alpha)*power((T_sup(t)-Tini_sup,nu))-
bkstop*Lambda(t)*(1+(a(t)-a(t-1))-delta*ta*rc)+sqrt((a(t)-a(t-1))-delta*ta*rc)*(a(t)-a(t-1))-
delta*ta*rc)+epsillon))/(2*delta*ta*rc)*Eb(t)*(a(t)*a(t))/Pop(t))
*disc(t));
carbone1(t+1) ..
Atmo(t+1)=eCtrans11*Atmo(t)+Ctrans12*Bio(t)+delta*Eb(t)*(1-a(t));
carbone2(t+1) ..
Bio(t+1)=eCtrans21*Atmo(t)+Ctrans22*Bio(t)+Ctrans23*Oc(t);
carbone3(t+1) ..
Oc(t+1)=eCtrans32*Bio(t)+Ctrans33*Oc(t);
tempatmo(t+1) ..
T_sup(t+1)=e=(1-C1*(Lam+C2))*T_sup(t)+C1*C2*T_inf(t)
+C1*force*log(Atmo(t)/Atmo_PI)/log(2);
tempoc(t+1) ..
T_inf(t+1)=e=C3*T_sup(t)+(1-C3)*T_inf(t);
model RESP_null /obj_null,carbone1,carbone2,carbone3,tempatmo,tempoc/;
model RESPFCCR /objectif,carbone1,carbone2,carbone3,tempatmo,tempoc/;
option solprint=off;
option limcol=0;
option limrow=0;
option sysout=off;
* boucle sur indice
loop(boucle(indice),
beta=cal_beta(boucle);
alpha=cal_alpha(boucle)/(2**nu);
solve RESPFCCR using nlp maximizing U;
Vartemp(t)=T_sup.l(t)-Tini_sup;
Ryhme(t)=T_sup.l(t+1)-T_sup.l(t);
Emette(t)=Eb(t)*(1-a.l(t));
Ryhme(t:last)=0;
Budget=sum(t,
Pop(t)*Log(const*1000000*(Fib(t)*(1-alpha*(T_sup.l(t)-Tini_sup)**nu)-
bkstop*Lambda(t)*(1+(a.l(t)-a.l(t-1))-delta*ta*rc)+sqrt((a.l(t)-a.l(t-1))-delta*ta*rc)*(a.l(t)-
a.l(t-1))-delta*ta*rc)+epsillon))/(2*delta*ta*rc)*Eb(t)*(a.l(t)*a.l(t))/Pop(t))
*(theta-T_sup.l(t)+Tini_sup)**beta)*disc(t));
Cout(t)=bkstop*Lambda(t)*(1+(a.l(t)-a.l(t-1))-delta*ta*rc)+sqrt((a.l(t)-a.l(t-1))-
delta*ta*rc)+epsillon))/(2*delta*ta*rc)*Eb(t)*(a.l(t)**3);
Ecumcal=sum(t,delta*Eb(t)*(1-a.l(t)));
);
beta=cal_beta('6sizieme');
alpha=cal_alpha('6sizieme')/(2**nu);
solve RESP_null using nlp maximizing U;
Vartemp(t)=T_sup.l(t)-Tini_sup;
Ryhme(t)=T_sup.l(t+1)-T_sup.l(t);
Emette(t)=Eb(t)*(1-a.l(t));
Ryhme(t:last)=0;
Budget=sum(t,
Pop(t)*Log(const*1000000*(Fib(t)*(1-alpha*(T_sup.l(t)-Tini_sup)**nu)-
bkstop*Lambda(t)*(1+(a.l(t)-a.l(t-1))-delta*ta*rc)+sqrt((a.l(t)-a.l(t-1))-delta*ta*rc)*(a.l(t)-
a.l(t-1))-delta*ta*rc)+epsillon))/(2*delta*ta*rc)*Eb(t)*(a.l(t)*a.l(t))/Pop(t))
*disc(t));
Cout(t)=bkstop*Lambda(t)*(1+(a.l(t)-a.l(t-1))-delta*ta*rc)+sqrt((a.l(t)-a.l(t-1))-
delta*ta*rc)+epsillon))/(2*delta*ta*rc)*Eb(t)*(a.l(t)**3);
Ecumcal=sum(t,delta*Eb(t)*(1-a.l(t)));

```

ANNEXE 3 : code du modèle RESPONSE_A (chapitre VI)

Les 2 codes qui sont donnés ci-après correspondent aux modèles employés au chapitre VI de la thèse : modèles coût-bénéfice pour évaluer les politiques climatiques de précaution en contexte incertain.

Fonctions de dommages à seuils vs fonction de dommages quadratiques en présence d'incertitude sur la sensibilité du climat (§ III.1.1)

```

$title RESPONSE_Delta: Approche C/B avec fonction d'utilite
* pour test sur parametrage fonction de dommage (quad, seuil) en presence incertitude sur
sensibilite climat

Sets
t dates du programme /1990,2000,2010,2020,2030,2040,2050,2060,2070,2080,2090,2100,
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 date
tlast(t) derniere date
date date arrivee info /1990,2000,2010,2020,2030,2040,2050,2060,2070,2080,2090,2100/
s etat du monde /L,C,H/
;

tfirst(t)=yes$(ord(t) eq 1);
tlast(t)=yes$(ord(t) eq card(t));
alias (s,ss);

Scalars
delta pas de temps (an) /10/
ptp preference pure pour present (%) /0.03/
tinit date initiale /1990/
dateinfo date arrivee info /2300/
tinfo date d'arrivee info (ordinal)
Budget valeur de l'objectif espere (VI) pour le fichier de sortie

* parametres du cout d'abattement
bkstop ct de la backstop (IE3$ par tc) /50/
tarc taux annuel de renouvellement du capital emetteur /0.0001/
epsilon parametre de l'inertie /0.01/
tapt taux annuel de penetration du progres technique /0.01/

*parametres de la fonction de dommage
seuil_inf borne inferieure du seuil /1.7/
seuil_sup borne inferieure du seuil /2.3/
e amplitude du virage /0.1/
d hauteur du saut /0.04/
alpha coeff. fonction dommage puissance /0.006/
alpha2 exposant fonction puissance /2/
beta coeff. fonction dommage lin. /0.005/
pi proba. occurrence fonction puissance /0/

* parametres du C-cycle
Atmo_PI concentration atmo preindustrielle(IE9 tc)
Atmo_80 concentration atmo 1980 (IE9 tc)
Atmo_ini concentration atmo 1990 (IE9 tc)
Bio_ini concentration biosphere + oc. sup 1990 (IE9 tc)
Oc_ini concentration oc. profond 1990 (IE9 tc)
Trans11 Carbon cycle transition matrix /758.19133/
Trans21 Carbon cycle transition matrix /792.59567/
Trans31 Carbon cycle transition matrix /0.66616/
Trans41 Carbon cycle transition matrix /0.33384/
Trans51 Carbon cycle transition matrix /0/
Trans61 Carbon cycle transition matrix /0.27607/
Trans71 Carbon cycle transition matrix /0.60897/
Trans81 Carbon cycle transition matrix /0.11496/
Trans91 Carbon cycle transition matrix /0.11496/

```

```

Ctrans13 Carbon cycle transition matrix /0/
Ctrans23 Carbon cycle transition matrix /0.00422/
Ctrans33 Carbon cycle transition matrix /0.99578/
*
* parametres des equations de temperature
Tini_sup80 ecart temp moy globale atmo entre 1980 et 1900 /0.8249988/
Tini_low80 ecart temp moy globale oc entre 1980 et 1900 /0.3005746/
C1 coeff. transfert /0.4791321/
C2 coeff. transfert /0.1093887/
C3 coeff. transfert /0.1313768/
*
;

```

```

tinfo=(dateinfo-tinit)/delta+1;
bkstop=1/3;
tarc=1/tarc;
Atmo_PI=280/0.471;
Atmo_80=338.4/0.471;

```

```

Parameters
Eb(t) /1990 7.10,
2000 7.97,
2010 10.88,
2020 12.64,
2030 14.48,
2040 15.35,
2050 16.38,
2060 16.00,
2070 15.73,
2080 15.18,
2090 14.30,
2100 13.49,
2110 10,
2120 10,
2130 10,
2140 8,
2150 8,
2160 8,
2170 8,
2180 8,
2190 4,
2200 4,
2210 4,
2220 4,
2230 0,
2240 0,
2250 0,
2260 0,
2270 0,
2280 0,
2290 0,
2300 0/
* soit 2455 Gtc emises

emissions annuelles en Gtc (source:ALM)

PIB mondial en IE12 US90$ (source:ALM)
/1990 20.9,
2000 26.7,
2010 37.9,
2020 56.5,
2030 89.1,
2040 127.1,
2050 181.3,
2060 235.1,
2070 304.7,
2080 377.4,
2090 446.6,
2100 528.5,
2110 625.4,
2120 740.1,
2130 875.8,
2140 1036.5,
2150 1226.5,

```

```

1160 1451.5,
1170 1717.6,
1180 2032.6,
1190 2405.4,
1200 2846.5,
1210 3368.5,
1220 3966.2,
1230 4717.2,
1240 5582.3,
1250 6606.0,
1260 7817.5,
1270 9251.1,
1280 10947.6,
1290 12955.2,
1300 15331/

Pop(t) /1990 5262,
2000 6117,
2010 6805,
2020 7493,
2030 8182,
2040 8439,
2050 8704,
2060 8538,
2070 8375,
2080 8030,
2090 7528,
2100 7056,
2110 6615,
2120 6201,
2130 6000,
2140 6000,
2150 6000,
2160 6000,
2170 6000,
2180 6000,
2190 6000,
2200 6000,
2210 6000,
2220 6000,
2230 6000,
2240 6000,
2250 6000,
2260 6000,
2270 6000,
2280 6000,
2290 6000,
2300 6000/

facteur de proges technique ct d'abtt
parametre d'actualisation
/L 0.167,C 0.666,H 0.167/
*p(s) proba d'occurrence pessimiste /L 0.167,C 0.167,H 0.666/
*p(s) proba d'occurrence optimiste /L 0.666,C 0.167,H 0.167/

facteur retrocontrôle climatique
forçage radiatif 2xCO2 /L 3.71,C 3.71,H 3.71/
sensibilité du modèle /L 2.5,C 3.5,H 4.5/
ecart temp moy globale atmo entre 1990 et PI
Tini_inf(s)
ecart temp moy globale oc entre 1990 et PI
Tini_inf(s)
rythme decennal evolution temperature (pour le fichier de sortie)
Vartemp(t,s)
budget pour chacun des etats du monde (pour le fichier de sortie)
BudgetS(s)
couts pour chacun des etats du monde (pour le fichier de sortie)
Cout (t,s)
dommages pour chacun des etats du monde (pour le fichier de sortie)
Dam (t,s)
emissions cumulees jusqu'en 2220 (pour le fichier de sortie)
Ecumcal(s)
;

Lambda(t)
disc(t)
*
p(s) proba d'occurrence centre /L 0.167,C 0.666,H 0.167/
*p(s) proba d'occurrence pessimiste /L 0.167,C 0.167,H 0.666/
*p(s) proba d'occurrence optimiste /L 0.666,C 0.167,H 0.167/

facteur retrocontrôle climatique
forçage radiatif 2xCO2 /L 3.71,C 3.71,H 3.71/
sensibilité du modèle /L 2.5,C 3.5,H 4.5/
ecart temp moy globale atmo entre 1990 et PI
Tini_inf(s)
ecart temp moy globale oc entre 1990 et PI
Tini_inf(s)
rythme decennal evolution temperature (pour le fichier de sortie)
Vartemp(t,s)
budget pour chacun des etats du monde (pour le fichier de sortie)
BudgetS(s)
couts pour chacun des etats du monde (pour le fichier de sortie)
Cout (t,s)
dommages pour chacun des etats du monde (pour le fichier de sortie)
Dam (t,s)
emissions cumulees jusqu'en 2220 (pour le fichier de sortie)
Ecumcal(s)
;

Lambda(t)=0.25+0.75*exp(-tapt*delta*(ord(t)-1));
disc(t)=exp(-ptp*delta*(ord(t)-1));
loop(s, lam(s))=forc(s)/temp2x(s);
loop(s, Tini_sup(s))=(1-
C1*(lam(s)+C2))*Tini_sup80+C1*C2*Tini_low80+C1*forc(s)*log(Atmo_80/Atmo_PI)/log(2));
loop(s, Tini_inf(s))=C3*Tini_sup80+(1-C3)*Tini_low80;

```

```

* deux fichiers de sortie
file sensclst /inctxseuil.csv/;
sensclst.pw=500;
sensclst.nd=5;

file sensclst1 /inctxseuil_VI.csv/;
sensclst1.pw=500;
sensclst1.nd=5;

Variables
Atmo(t,s) conc. atmo date t (gtc)
Bio(t,s) conc. biosphere + oc. sup date t (gtc)
Oc(t,s) conc. ocean profond date t (gtc)
T_sup(t,s) augmentation temp. moy. globale atmo.(C)
T_inf(t,s) augmentation temp. moy. globale oc.(C)
a(t,s) niveau d'abattement (gtc)
U critere
;

positive variable Atmo,Bio,Oc,T_sup,T_inf,a;

Atmo.lo(t,s)=Atmo_ini/2;
Atmo.up(t,s)=Atmo_ini*50;
Bio.lo(t,s)=Bio_ini/2;
Bio.up(t,s)=Bio_ini*10;
Oc.lo(t,s)=Oc_ini/2;
Oc.up(t,s)=Oc_ini*2;
T_sup.up(t,s)=10;
T_inf.up(t,s)=10;
a.lo(t,s)=0.00000001;
a.up(t,s)=1;

Atmo.fx(tfirst,s)=Atmo_ini;
Bio.fx(tfirst,s)=Bio_ini;
Oc.fx(tfirst,s)=Oc_ini;
T_sup.fx(tfirst,s)=Tini_sup(s);
T_inf.fx(tfirst,s)=Tini_inf(s);
a.fx(tfirst,s)=0;

Equations
objectif fonction objectif
carbone1(t,s) dynamique Cycle atmo
carbone2(t,s) dynamique Cycle biosphere+oc. surface
carbone3(t,s) dynamique Cycle oc. profond
tempatmo(t,s) dynamique temperature moy globale atmo
tempoc(t,s) dynamique temperature moy globale oc.
constrinfo(t,s,ss) contrainte sur arrivee d'info
;

objectif .. U=e=sum(t,s),p(s)*
Pop(t)*log(1000000*(Plb(t)
-bkstop*Lambda(t)*(1+(a(t,s)-a(t-1,s)-delta*tarc)+sqrt(sqr(a(t,s)-a(t-1,s)-
delta*tarc)+epsilon))/(2*delta*tarc))*Eb(t)*(a(t,s)**3)
-Plb(t)*(pi*alpha*power((T_sup(t,s)-Tini_sup(s)),alpha2)
+(1-pi)*(beta*(T_sup(t,s)-Tini_sup(s))+d/(1+exp(log((2-e)/e)*((seuil_inf+seuil_sup-
2*(T_sup(t,s)-Tini_sup(s)))/(seuil_sup-seuil_inf))))))
)/Pop(t))
*disc(t));
carbone1(t+1,s).. Atmo(t+1,s)=e=Ctrans1*Atmo(t,s)+Ctrans2*Bio(t,s)+delta*Eb(t)*(1-
a(t,s));
carbone2(t+1,s).. Bio(t+1,s)=e=Ctrans21*Atmo(t,s)+Ctrans2*Bio(t,s)+Ctrans3*Oc(t,s);
carbone3(t+1,s).. Oc(t+1,s)=e=Ctrans32*Bio(t,s)+Ctrans3*Oc(t,s);
tempatmo(t+1,s).. T_sup(t+1,s)=e=(1-C1*(lam(s)+C2))*T_sup(t,s)+C1*C2*T_inf(t,s)
+C1*forc(s)*log(Atmo(t,s)/Atmo_PI)/log(2);
+C1*forc(s)*log(Atmo(t,s)/Atmo_PI)/log(2);
tempoc(t+1,s).. T_inf(t+1,s)=e=C3*T_sup(t,s)+(1-C3)*T_inf(t,s);
constrinfo(t,s,ss){ord(t)<tinfo}..
a(t,s)=e=a(t,ss);

model RESPDELTA /all/;
option solprint=off;

```

```
option limcol=0;
option limrow=0;
option sysout=off;
```

```
solve RESPDELTA using nlp maximizing 0;
```

```
Vartemp(t,s)=T_sup.1(t,s)-Tini_sup(s);
Rytime(t,s)=T_sup.1(t+1,s)-T_sup.1(t,s);
Rytime(t,last,s)=0;
loop(s);
BudgetS(s)=sum(t);
Pop(t)=log(1000000*(Pib(t)
-bkstop*Lambda(t)*(1+(a.1(t,s)-a.1(t-1,s)-delta*tarc)+sqrt(sqr(a.1(t,s)-a.1(t-1,s)-
delta*tarc)+epsilon)))/(2*delta*tarc))*Eb(t)*(a.1(t,s)**3)
-Pib(t)*(pi*alpha1*power((T_sup.1(t,s)-Tini_sup(s)),alpha2)
+(1-pi)*(beta*(T_sup.1(t,s)-Tini_sup(s))+g/(1+exp(log((2-e)/e)*((seuil_inf+seuil_sup-
2*(T_sup.1(t,s)-Tini_sup(s)))/(seuil_sup-seuil_inf))))))
)/Pop(t));
*disc(t));
);
Cout(t,s)=bkstop*Lambda(t)*(1+(a.1(t,s)-a.1(t-1,s)-delta*tarc)+sqrt(sqr(a.1(t,s)-a.1(t-1,s)-
delta*tarc)+epsilon)))/(2*delta*tarc))*Eb(t)*(a.1(t,s)**3);
Eucmal(s)=sum(t,delta*Eb(t)*(1-a.1(t,s)));
Budget=Sum(s,p(s)*BudgetS(s));
Dam(t,s)=pi*alpha1*power((T_sup.1(t,s)-Tini_sup(s)),alpha2)
+(1-pi)*(beta*(T_sup.1(t,s)-Tini_sup(s))+g/(1+exp(log((2-e)/e)*((seuil_inf+seuil_sup-
2*(T_sup.1(t,s)-Tini_sup(s)))/(seuil_sup-seuil_inf))))))
)/Pop(t));
* boucle sur date arrivee info de 2100--1990 (cert)
```

```
loop(date,
tinfo=13-ord(date);
dateinfo=2100+10*(1-ord(date));
solve RESPDELTA using nlp maximizing 0;
Vartemp(t,s)=T_sup.1(t,s)-Tini_sup(s);
Rytime(t,s)=T_sup.1(t+1,s)-T_sup.1(t,s);
Rytime(t,last,s)=0;
loop(s);
BudgetS(s)=sum(t);
Pop(t)=log(1000000*(Pib(t)
-bkstop*Lambda(t)*(1+(a.1(t,s)-a.1(t-1,s)-delta*tarc)+sqrt(sqr(a.1(t,s)-a.1(t-1,s)-
delta*tarc)+epsilon)))/(2*delta*tarc))*Eb(t)*(a.1(t,s)**3)
-Pib(t)*(pi*alpha1*power((T_sup.1(t,s)-Tini_sup(s)),alpha2)
+(1-pi)*(beta*(T_sup.1(t,s)-Tini_sup(s))+g/(1+exp(log((2-e)/e)*((seuil_inf+seuil_sup-
2*(T_sup.1(t,s)-Tini_sup(s)))/(seuil_sup-seuil_inf))))))
)/Pop(t));
*disc(t));
);
Cout(t,s)=bkstop*Lambda(t)*(1+(a.1(t,s)-a.1(t-1,s)-delta*tarc)+sqrt(sqr(a.1(t,s)-a.1(t-1,s)-
delta*tarc)+epsilon)))/(2*delta*tarc))*Eb(t)*(a.1(t,s)**3);
Budget=Sum(s,p(s)*BudgetS(s));
Eucmal(s)=sum(t,delta*Eb(t)*(1-a.1(t,s)));
Dam(t,s)=pi*alpha1*power((T_sup.1(t,s)-Tini_sup(s)),alpha2)
+(1-pi)*(beta*(T_sup.1(t,s)-Tini_sup(s))+g/(1+exp(log((2-e)/e)*((seuil_inf+seuil_sup-
2*(T_sup.1(t,s)-Tini_sup(s)))/(seuil_sup-seuil_inf))))))
)/Pop(t));
*disc(t));
);
```

Politiques climatiques de précaution et croyances sur les risques climatiques (§ III.2.)

```
$title RESPONSE_Delta: Approche C/B avec fonction d'utilite
```

```
* croyances sur les dommages: puissance ou seuil et sensibilité climat valeur centrale
```

```
Sets
```

```
t dates du programme /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 date
```

```
tlast(t) derniere date
```

```
date date arrivee info /1990,2000,2010,2020,2030,2040,2050,2060,2070,2080,2090,2100/
```

```
s etat du monde /P,S/
```

```
;
```

```
tfirst(t)=yes$(ord(t) eq 1);
```

```
tlast(t)=yes$(ord(t) eq card(t));
```

```
alias (s,ss);
```

```
Scalars
```

```
delta
```

```
ppp pas de temps (an) /10/
```

```
ppp preference pure pour present (%) /0.03/
```

```
tinit date initiale /1990/
```

```
dateinfo date arrivee info (ordinal) /2300/
```

```
tinfo valeur de l'objectif espere (VI) pour le fichier de sortie
```

```
*
```

```
* parametres du cout d'abattement
```

```
bkstop ct de la backstop (IE3$ par tc) /50/
```

```
tarc taux annuel de renouvellement du capital emetteur /0.0001/
```

```
epsilon parametre de l'inertie /0.01/
```

```
tapt taux annuel de penetration du progres technique /0.01/
```

```
*
```

```
*parametres de la fonction de dommage
```

```
seuil_inf borne inferieure du seuil /1.7/
```

```
seuil_sup borne inferieure du seuil /2.3/
```

```
e amplitude du virage /0.1/
```

```
d hauteur du saut /0.01/
```

```
*d hauteur du saut /0.03/
```

```
*alpha coeff. fonction dommage puissance /0.0065/
```

```
alpha1 exposant fonction puissance /2/
```

```
alpha2 coeff. fonction dommage lineaire /0.005/
```

```
beta coeff. fonction dommage lineaire /0.003/
```

```
*
```

```
* parametres du C-cycle
```

```
Atmo_P1 concentration atmo preindustrielle(IE9 tc)
```

```
Atmo_80 concentration atmo 1980 (IE9 tc) /758.19133/
```

```
Atmo_ini concentration atmo 1990 (IE9 tc) /792.59567/
```

```
Bio_ini concentration biosphere + oc. sup 1990 (IE9 tc) /19230/
```

```
Oc_ini concentration oc. profond 1990 (IE9 tc) /0.66616/
```

```
Crans11 Carbon cycle transition matrix /0.33384/
```

```
Crans21 Carbon cycle transition matrix /0/
```

```
Crans31 Carbon cycle transition matrix /0.27607/
```

```
Crans12 Carbon cycle transition matrix /0.60897/
```

```
Crans22 Carbon cycle transition matrix /0.11496/
```

```
Crans32 Carbon cycle transition matrix /0/
```

```
Crans13 Carbon cycle transition matrix /0.00422/
```

```
Crans23 Carbon cycle transition matrix /0.99578/
```

```
Crans33 Carbon cycle transition matrix /0/
```

```
*
```

```
* parametres des equations de temperature
```

```
Tini_sup80 ecart temp moy globale atmo entre 1980 et 1900 /0.8249988/
```

```
Tini_low80 ecart temp moy globale oc entre 1980 et 1900 /0.3005746/
```

```
C1 coeff. transfert /0.4791321/
```

```
C2 coeff. transfert /0.1093887/
```

```
C3 coeff. transfert /0.1313768/
```

```
lam facteur retrocontrôle climatique
```

```

forc      forcé radiatif 2xCO2
temp2x   sensibilité du modèle /3.71/
Tini_sup  écart temp moy globale atmo entre 1990 et FI /3.5/
Tini_inf  écart temp moy globale oc entre 1990 et FI
;

tinfo=(dateinfo-tinit)/delta+1;
tarc=1/tarc;
bkstop=1/3;
Atmo PI=280/0.471;
Atmo 80=338.4/0.471;
lam=forc/temp2x;
Tini_sup=(1-C1*(lam+C2))*Tini_sup80+C1*forc*log(Atmo_80/Atmo_PI)/log(2);
Tini_inf=C3*Tini_sup80*(1-C3)*Tini_low80;

```

Parameters
Emissions annuelles en GtC (source:Alm)

Eb(t)	/1990	7.10,
	2000	7.97,
	2010	10.88,
	2020	12.64,
	2030	14.48,
	2040	15.35,
	2050	16.38,
	2060	16.00,
	2070	15.73,
	2080	15.18,
	2090	14.30,
	2100	13.49,
	2110	12.26,
	2120	10.79,
	2130	8.95,
	2140	6.80,
	2150	4.65,
	2160	2.76,
	2170	1.35,
	2180	0.51,
	2190	0.13,
	2200	0.02,
	2210	0,
	2220	0,
	2230	0,
	2240	0,
	2250	0,
	2260	0,
	2270	0,
	2280	0,
	2290	0,
	2300	0/

*soit 2077 GtC emises

PIB mondial en 1E12 US90\$ (source:Alm)

Pib(t)	/1990	20.9,
	2000	26.7,
	2010	37.9,
	2020	56.5,
	2030	89.1,
	2040	127.1,
	2050	181.3,
	2060	235.1,
	2070	304.7,
	2080	377.4,
	2090	446.6,
	2100	528.5,
	2110	616.8,
	2120	713.5,
	2130	845.7,
	2140	1029.5,
	2150	1246.3,
	2160	1501.9,
	2170	1802.8,
	2180	2156.7,
	2190	2572.8,

2200	3061.8,
2210	3636.3,
2220	4311.0,
2230	5103.3,
2240	6033.7,
2250	7126.0,
2260	8408.6,
2270	9914.3,
2280	11682.0,
2290	13757.3,
2300	16193.6/

Population mondiale en million hb (source: Alm)

Pop(t)	/1990	5262,
	2000	6117,
	2010	6805,
	2020	7493,
	2030	8182,
	2040	8439,
	2050	8704,
	2060	8538,
	2070	8375,
	2080	8030,
	2090	7528,
	2100	7056,
	2110	6615,
	2120	6201,
	2130	6000,
	2140	6000,
	2150	6000,
	2160	6000,
	2170	6000,
	2180	6000,
	2190	6000,
	2200	6000,
	2210	6000,
	2220	6000,
	2230	6000,
	2240	6000,
	2250	6000,
	2260	6000,
	2270	6000,
	2280	6000,
	2290	6000,
	2300	6000/

```

Lambda(t)  facteur de progres technique ct d'abtt
disc(t)    parametre d'actualisation
pi(s)      proba d'occurrence /P 1, S 0/
Vertemp(t,s) hausse de la temperature (pour le fichier de sortie)
Rythme(t,s) rythme decennal evolution temperature (pour le fichier de sortie)
Budget(s)  budget pour chacun des etats du monde (pour le fichier de sortie)
Cout (t,s) couts pour chacun des etats du monde (pour le fichier de sortie)
Dam (t,s)  dommages pour chacun des etats du monde (pour le fichier de sortie)
Emabatt(t,s) emissions effectivement realisees
;
Lambda(t)=0.25+0.75*exp(-tapt*delta*(ord(t)-1));
disc(t)=exp(-ptp*delta*(ord(t)-1));
* deux fichiers de sortie
file sensclst /incDamQuad50.csv/;
sensclst.pw=500;
sensclst.nd=5;
file sensclst1 /incDamQuad50_VI.csv/;
sensclst1.pw=500;
sensclst1.nd=5;

```

Variables
Atmo(t,s) conc. atmo date t (GtC)
Bio(t,s) conc. biosphere + oc. sup date t (GtC)

```

Oc(t,s)
T_sup(t,s)
T_inf(t,s)
a(t,s)
U
;

positive variable Atmo,Bio,OC,T_sup,T_inf,a;

Atmo.lo(t,s)=Atmo_ini/2;
Atmo.up(t,s)=Atmo_ini*50;
Bio.lo(t,s)=Bio_ini/2;
Bio.up(t,s)=Bio_ini*10;
OC.lo(t,s)=OC_ini/2;
OC.up(t,s)=OC_ini*2;
T_sup.up(t,s)=10;
T_inf.up(t,s)=10;
a.lo(t,s)=0.00000001;
a.up(t,s)=1;

Atmo.fx(tfirst,s)=Atmo_ini;
Bio.fx(tfirst,s)=Bio_ini;
OC.fx(tfirst,s)=OC_ini;
T_sup.fx(tfirst,s)=Tini_sup;
T_inf.fx(tfirst,s)=Tini_inf;
a.fx(tfirst,s)=0;

Equations
;

fonction objectif
carbone1(t,s)
carbone2(t,s)
carbone3(t,s)
tempoc(t,s)
constrinfo(t,s,ss)
;

U=e=sum((t,s),p(s)*
Pop(t)*log(1000000*Pib(t)
-bkstop*Lambda(t)*(1+(a.1(t,s)-a(t-l,s)-delta*ta)rc)+sqr(sqr(a.1(t,s)-a(t-l,s)-
delta*ta)rc+epsilon))/(2*delta*ta)rc)*Eb(t)*(a.1(t,s)**3)
-Pib(t)*(pi(s)*alpha*power((T_sup.1(t,s)-Tini_sup)/(2-e)/e)*((seuil_inf+seuil_sup-
+ (1-pi(s))*beta*(T_sup.1(t,s)-Tini_sup)+q/(1+exp(log((2-e)/e))))))
2*(T_sup.1(t,s)-Tini_sup))/(seuil_sup-seuil_inf))))
)/Pop(t))
*disc(t));

Atmo(t+1,s)=e=Ctrans1*Atmo(t,s)+Ctrans2*Bio(t,s)+delta*Eb(t)*(1-
a(t,s));
carbone2(t+1,s)..
carbone3(t+1,s)..
tempatmo(t+1,s)..
+CL1forc*log(Atmo(t,s)/Atmo_FI)/log(2);
tempoc(t+1,s)..
T_inf(t+1,s)=e=C3*T_sup(t,s)+(1-C3)*T_inf(t,s);
constrinfo(t,s,ss){ord(t)<tlnfo}..
a(t,s)=e=a(t,ss);

model RESPDELTA /all/;

option solprint=off;
option limcol=0;
option limrow=0;
option sysout=off;

solve RESPDELTA using nlp maximizing U;
solve RESPDELTA using nlp maximizing U;
solve RESPDELTA using nlp maximizing U;

Vartemp(t,s)=T_sup.1(t,s)-Tini_sup;
Rythme(t,last,s)=0;
Loop(s,
BudgetS(s)= sum(t,
Pop(t)*log(1000000*Pib(t)
-bkstop*Lambda(t)*(1+(a.1(t,s)-a(t-l,s)-delta*ta)rc)+sqr(sqr(a.1(t,s)-a(t-l,s)-
delta*ta)rc+epsilon))/(2*delta*ta)rc)*Eb(t)*(a.1(t,s)**3)
-Pib(t)*(pi(s)*alpha*power((T_sup.1(t,s)-Tini_sup)/(2-e)/e)*((seuil_inf+seuil_sup-
+ (1-pi(s))*beta*(T_sup.1(t,s)-Tini_sup)+q/(1+exp(log((2-e)/e))))))
2*(T_sup.1(t,s)-Tini_sup))/(seuil_sup-seuil_inf))))
)/Pop(t))
*disc(t));

sensclst.ap=1;
);

```

```

-bkstop*Lambda(t)*(1+(a.1(t,s)-a(t-l,s)-delta*ta)rc)+sqr(sqr(a.1(t,s)-a(t-l,s)-
delta*ta)rc+epsilon))/(2*delta*ta)rc)*Eb(t)*(a.1(t,s)**3)
-Pib(t)*(pi(s)*alpha*power((T_sup.1(t,s)-Tini_sup)/(2-e)/e)*((seuil_inf+seuil_sup-
+ (1-pi(s))*beta*(T_sup.1(t,s)-Tini_sup)+q/(1+exp(log((2-e)/e))))))
2*(T_sup.1(t,s)-Tini_sup))/(seuil_sup-seuil_inf))))
)/Pop(t))
*disc(t));

);

Cout(t,s)=bkstop*Lambda(t)*(1+(a.1(t,s)-a(t-l,s)-delta*ta)rc)+sqr(sqr(a.1(t,s)-a(t-l,s)-
delta*ta)rc+epsilon))/(2*delta*ta)rc)*Eb(t)*(a.1(t,s)**3);
Budget=sum(s, p(s)*BudgetS(s));
Emabatt(t,s)=Eb(t)*(1-a.1(t,s));
Dam(t,s)=Pib(t)*(pi(s)*alpha*power((T_sup.1(t,s)-Tini_sup),alpha2)
+(1-pi(s))*d/(1+exp(log((2-e)/e)*((seuil_inf+seuil_sup-2*(T_sup.1(t,s)-Tini_sup)
seuil_inf))))));

* boucle sur date arrivee info de 2100--1990 (cert)

loop(date,
tinfo=13-ord(date);
dateinfo=2100+10*(1-ord(date));
solve RESPDELTA using nlp maximizing U;
solve RESPDELTA using nlp maximizing U;
solve RESPDELTA using nlp maximizing U;
Vartemp(t,s)=T_sup.1(t,s)-Tini_sup;
Rythme(t,last,s)=0;
Loop(s,
BudgetS(s)= sum(t,
Pop(t)*log(1000000*Pib(t)
-bkstop*Lambda(t)*(1+(a.1(t,s)-a(t-l,s)-delta*ta)rc)+sqr(sqr(a.1(t,s)-a(t-l,s)-
delta*ta)rc+epsilon))/(2*delta*ta)rc)*Eb(t)*(a.1(t,s)**3)
-Pib(t)*(pi(s)*alpha*power((T_sup.1(t,s)-Tini_sup),alpha2)
+(1-pi(s))*beta*(T_sup.1(t,s)-Tini_sup)+q/(1+exp(log((2-e)/e)*((seuil_inf+seuil_sup-
2*(T_sup.1(t,s)-Tini_sup))/(seuil_sup-seuil_inf))))))
)/Pop(t))
*disc(t));

);

Cout(t,s)=bkstop*Lambda(t)*(1+(a.1(t,s)-a(t-l,s)-delta*ta)rc)+sqr(sqr(a.1(t,s)-a(t-l,s)-
delta*ta)rc+epsilon))/(2*delta*ta)rc)*Eb(t)*(a.1(t,s)**3);
Budget=sum(s, p(s)*BudgetS(s));
Emabatt(t,s)=Eb(t)*(1-a.1(t,s));
Dam(t,s)=Pib(t)*(pi(s)*alpha*power((T_sup.1(t,s)-Tini_sup),alpha2)
+(1-pi(s))*d/(1+exp(log((2-e)/e)*((seuil_inf+seuil_sup-2*(T_sup.1(t,s)-Tini_sup)
seuil_inf))))));

sensclst.ap=1;
);

```