

Article

Attention au rythme du changement climatique !

Philippe Ambrosi

Économie de l'environnement, Laboratoire des sciences du climat et de l'environnement (LSCE), CEA-CNRS, UMR 1572, LSCE/DSM, CEA Saclay, L'Orme des Merisiers, 91191 Gif-sur-Yvette, France

L'objectif de la Convention Climat est d'interdire à terme une évolution dangereuse de notre environnement, en contraignant la variation globale de température de la planète, maintenue sous un seuil d'environ 2°C. La réduction des émissions de gaz à effet de serre ne peut se traduire dans un échéancier qui soit optimal et respecte ces objectifs à coût minimal, sans prendre en compte l'incertitude de nos connaissances scientifiques, et en particulier celle qui affecte la sensibilité du climat aux gaz à effet de serre. L'étude présentée ici analyse pour la première fois l'impact d'une réduction progressive de cette incertitude. Elle propose des objectifs très précieux aux climatologues, en documentant l'intérêt associé à des programmes de recherche qui sont eux-mêmes longs et coûteux, et donc susceptibles de fournir des résultats alors que le réchauffement de la planète sera bien engagé.

La Rédaction

Mots-clés :
analyse coût-efficacité ;
modélisation intégrée ;
politique climatique ;
sensibilité du climat ;
valeur de l'information

Résumé – Pour évaluer les politiques climatiques dans un cadre coût-efficacité sous contraintes d'évolution du climat (amplitude du réchauffement et son rythme), nous avons développé *RESPONSE_Θ*, un modèle intégré de contrôle optimal. Nos résultats montrent que l'incertitude sur la sensibilité du climat implique de suivre une trajectoire d'émissions très contraignante à court terme, d'autant plus que l'information sur ce paramètre arrive tard. En raison de cette incertitude, un objectif comme +2 °C pourrait donc impliquer une contrainte très lourde sur les émissions. Nous montrons en outre qu'il est encore plus important pour la décision de court terme de résoudre l'incertitude sur la contrainte de rythme que l'incertitude sur la sensibilité du climat ou l'amplitude du réchauffement. Il est donc urgent de poursuivre l'effort de recherche sur les risques du changement climatique, afin de caractériser un garde-fou acceptable pour limiter le rythme du réchauffement.

Keywords:
climate policy;
climate sensitivity;
cost-effectiveness
analysis;
integrated modelling;
value of information

Abstract – *Why the rate of global climate change matters, and what does it cost?* Global mean temperature rise is a better indicator of climate risks than are atmospheric greenhouse gas concentration ceilings because it is a synthetic index of the on-going climate change, because every assessment of regional impacts refers to this parameter and because it allows to take into account the rate of climate change, a key determinant of vulnerability. To assess climate policies in a cost-efficiency framework with constraints on the magnitude and rate of global climate change, we developed *RESPONSE_Θ*, an optimal control integrated assessment model. Our results show that the uncertainty about climate sensitivity leads to significant short-term mitigation efforts, a fact amplified by the tardy arrival of the information regarding this parameter. Given this uncertainty, a +2 °C objective could lead to rather stringent policy recommendations for the coming decades and might prove unacceptable. We finally show that for short-term decision, solving the uncertainty about the rate constraint is even more important than solving that about climate sensitivity or magnitude of warming. This means that the critical rate of climate change, i.e. a transient characteristic of climate risks, matters much more than the long-term objective of climate policy, i.e. the critical magnitude of climate change. Therefore, research should be aimed at better characterizing climate change risks in order to help decision makers to agree on a safe guardrail to limit the rate of global warming.

Auteur correspondant : philippe.ambrosi@cea.fr

Encadrer les risques climatiques pour approcher ce que dangereux veut dire

Alors même que les estimations monétaires des dommages du changement climatique comme leur représentation par les modèles intégrés restent encore très fragiles¹, une première réponse à ces menaces potentielles a été de définir les risques climatiques en creux, comme des seuils de danger. Dans l'esprit de la convention Climat (UNFCCC, 1992), qui renvoie dans son objectif à la stabilisation des concentrations, on a alors recherché la façon la moins coûteuse de respecter un jeu donné de plafonds de concentration atmosphérique de gaz à effet de serre (GES), plafonds qui reflètent diverses croyances sur le niveau de perturbation dangereuse du système climatique (dérèglements des grands mécanismes du climat vers une rupture brutale, pression accrue sur les écosystèmes, menaces pour les régions vulnérables et nos descendants. . .) et diverses attitudes vis-à-vis du risque (optimisme ou pessimisme vis-à-vis de nos capacités d'adaptation, par exemple)².

Tout choix d'une mesure des risques climatiques relève en fait d'un arbitrage entre précision avec laquelle peuvent être décrits les bénéfices des politiques climatiques selon cette mesure et pertinence de cette description en regard des préoccupations des décideurs. Au long de la chaîne causale qui conduit des émissions de GES aux dommages, cette précision s'amenuise quand on se dirige vers l'aval (en raison de l'amplification des incertitudes entre chaque maillon), tandis que cette pertinence s'accroît. Pour une trajectoire d'abattement donnée, par exemple, la concentration atmosphérique de CO₂ peut être déterminée avec un niveau de précision beaucoup plus fin que n'importe quel autre indicateur du changement climatique et de ses conséquences plus en aval ; c'est 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, la référence à un objectif de stabilisation à long terme de la concentration atmosphérique de CO₂ n'est qu'une approximation très grossière de la diversité des risques climatiques et des enjeux distributifs associés : il s'agit d'une mesure peu tangible (elle opère un raccourci saisissant entre concentrations stabilisées et dommages

résultants³) et il n'y est question que des risques de long terme.

En se déplaçant d'un maillon vers l'aval, la variation de la température moyenne globale constitue en revanche un bien meilleur indicateur du risque climatique, et ce, pour trois raisons :

1. C'est un signal synthétique du changement climatique en cours et il incorpore l'incertitude sur la réponse du climat.
2. C'est un indicateur plus proche de la réalité des dommages, car toutes les évaluations régionales des dommages y font référence. Il permet ainsi de mettre en correspondance, de manière plus explicite, l'objectif de toute politique climatique (dès lors qu'il est formulé en termes d'amplitude du réchauffement global) et un jeu d'impacts associés⁴.
3. C'est une mesure qui permet de prendre en compte le rythme du changement climatique, déterminant essentiel des risques. En effet, s'il est trop élevé par rapport à nos capacités de réaction que viennent ralentir les inerties socioéconomiques, les dommages seront très supérieurs à une situation où l'évolution du système climatique et le déploiement des impacts sont beaucoup plus lents, permettant de planifier à temps des mesures d'adaptation appropriées.

C'est pourquoi la communauté scientifique s'est concentrée (avec une accélération notable ces deux dernières années) sur l'évaluation des politiques climatiques dans le contexte de la stabilisation du climat. De manière générale, c'est un seuil de réchauffement dangereux de +2 °C par rapport à l'époque préindustrielle qui a reçu toute l'attention. Un tel objectif (auquel était subordonné un objectif plus opérationnel, exprimé en plafond de concentration) a été mentionné pour la première fois en 1996, par l'Union européenne : « [. . .] *the global average should not exceed the preindustrial level by more than 2 °C and therefore carbon dioxide concentration levels lower than 550 ppm should guide global emissions reduction efforts* » (European Commission, 1996). Il est cependant longtemps

³ Et ce, d'autant plus que l'incertitude vient brouiller de telles correspondances : à titre d'illustration, si la concentration atmosphérique de CO₂ était stabilisée à 550 ppm, la température moyenne globale pourrait s'élever entre +1,5 °C et +4,5 °C (par rapport à l'époque préindustrielle), large intervalle imputable à l'incertitude sur la sensibilité du climat, sur laquelle nous reviendrons.

⁴ Et c'est précisément cette référence qu'utilisent les auteurs du troisième rapport du GIEC au chapitre XIX (McCarthy *et al.*, 2001) pour résumer de manière synoptique l'information alors disponible sur les impacts potentiels du changement climatique à la fin du siècle : une approche qualitative, avec un aperçu des risques pour cinq grandes catégories (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).

¹ Sur les difficultés persistantes de leur évaluation, voir par exemple Ambrosi (2004), au chapitre I, Hitz et Smith (2004) ou Ambrosi et Courtois (2004).

² Une version préliminaire de ces résultats a été présentée au LIII^e congrès de l'Association française de sciences économiques (Paris, 16 septembre 2004) : « Politiques climatiques en présence d'incertitudes sur la sensibilité du climat, sur le rythme et le niveau critiques de réchauffement : leçons du modèle RESPONSE_Θ ».

resté anecdotique, jusqu'à s'affirmer récemment comme repère au moment où s'est opéré un glissement d'un cadre en concentration à un cadre en température. Il a ainsi été rappelé par l'Union européenne au sortir de la 10^e Conférence des Parties à la convention Climat (Council of the European Union, 2004). De même, l'*International Climate Change Taskforce* (2005) recommande un objectif similaire.

En spécifiant une telle contrainte, on définit un espace à l'intérieur duquel les impacts du changement climatique et leurs répercussions socioéconomiques sont considérés comme socialement acceptables. Soit que des seuils objectifs de danger soient clairement identifiés (autrement dit, une dérive de la machine climatique, comme l'extinction de la circulation thermohaline dans l'Atlantique nord, est dangereuse *per se*), soit qu'à une échelle régionale, l'évolution du climat se traduise par des impacts jugés critiques (par exemple, la disparition d'écosystèmes vulnérables, comme les récifs coralliens ou la végétation de montagne, une perturbation de la mousson sur le sous-continent indien, un réchauffement trop important de l'Arctique, le risque de submersion pour les petits États insulaires). C'est-à-dire qu'il s'agit d'une approche tournée vers les risques (et non pas vers les coûts de la prévention), et de nombreuses études d'impacts sont désormais disponibles pour fournir une information pertinente à celui qui souhaite s'en tenir à des approches de type sécurité absolue⁵. Ainsi, les résultats du *Global Fast Track Assessment* (Parry *et al.*, 2001) suggèrent, par exemple, un seuil de danger comparable, avec des risques de pénurie d'eau croissant significativement pour un réchauffement proche de +2 °C. Plus récemment, un rapport conclut, au terme d'une abondante revue des études d'impacts disponibles, à des recommandations similaires, avec un changement climatique dangereux dès lors que son amplitude atteint les +2 ou 3 °C (ECF, 2004).

En comparaison des études des trajectoires d'émissions dans le contexte de la stabilisation des concentrations⁶, les contributions sont ici moins nombreuses. Elles ont principalement examiné l'influence de l'incertitude à propos de la sensibilité du climat⁷ sur l'enveloppe admissible des émissions de GES, de même que l'influence du niveau du seuil de réchauffement retenu comme objectif. De manière générale, on peut y distinguer trois grands courants, qui se différencient selon la manière

dont l'incertitude est traitée, selon le degré de complexité des modèles sous-jacents et selon la nature des cadres de décision utilisés :

1. Les évaluations intégrées probabilisées, qui cherchent à estimer les risques de franchir des seuils climatiques (amplitude absolue du réchauffement global ou son rythme) pour un jeu de scénarios d'émissions, ou qui cherchent à produire des scénarios de changement climatique probabilisés (ou à en quantifier la vraisemblance). Les résultats typiques consistent en des distributions de probabilités sur le risque de dépassement d'objectifs de stabilisation du climat ou en des scénarios probabilisés de changement climatique intégrant leurs modifications selon que l'on réduit de manière précoce ou tardive les émissions de GES (Den Elzen et Meinshausen, 2005a; Hare et Meinshausen, 2004; Knutti *et al.*, 2003; Mastrandrea et Schneider, 2004; Meehl *et al.*, 2005; Meinshausen, 2005; O'Neil et Oppenheimer, 2004; Wigley, 2005).
2. Les approches inverses, comme la *Safe Landing Analysis* (Alcamo et Kreileman, 1996; Swart *et al.*, 1998) ou la *Tolerable Windows Approach* (Kriegler et Bruckner, 2004; Toth *et al.*, 2003a,b), qui cherchent à définir un corridor d'émissions admissibles en fonction d'un jeu de contraintes renvoyant, d'une part, à des impacts jugés dangereux (par exemple, hausse de la température moyenne globale, son rythme, hausse du niveau des mers) et, d'autre part, à des considérations économiques et techniques (rythme maximum admissible de décarbonisation de l'économie, enjeux distributifs). La *Tolerable Windows Approach* diffère de la *Safe Landing Analysis* en ce qu'elle s'appuie sur un modèle beaucoup plus détaillé, à l'échelle régionale au lieu de l'échelle globale. Il est ainsi possible de préciser des contraintes renvoyant à des impacts sectoriels ou régionaux (par exemple, préserver deux tiers de la végétation naturelle dans les zones non agricoles) ou aux coûts de réduction des émissions (limite supérieure pour protéger la consommation, distribution entre régions). Par un jeu d'analyses de sensibilités étendues, ces deux approches permettent d'examiner l'influence relative d'un jeu de contraintes sur la décision en contexte incertain. Cependant, elles ne prescrivent pas de sentier d'émissions : elles délimitent un corridor d'émissions admissibles, mais le choix d'une trajectoire donnée au sein de ce corridor est laissé aux décideurs.
3. Les analyses coût-efficacité, qui cherchent à identifier la trajectoire d'émission à moindre coût pour un objectif climatique donné. Une nouvelle fois, l'incertitude peut être traitée au moyen d'analyses de sensibilité (Böhringer *et al.*, à paraître; Caldeira *et al.*, 2003; Den Elzen et Meinshausen, 2005b; Richels *et al.*, 2004). Cependant, à la différence des approches précédentes, il est ici possible d'examiner l'interaction

⁵ Pour la synthèse la plus récente, voir Warren (2005).

⁶ Pour une revue, se reporter à Metz *et al.* (2001, chap. VIII et X).

⁷ C'est le premier contributeur à l'incertitude sur l'amplitude du réchauffement climatique pour un scénario donné de concentration de GES. La sensibilité du climat est définie comme la température d'équilibre atteinte par le système climatique pour un forçage climatique constant, fixé au doublement de la concentration atmosphérique préindustrielle de CO₂ (soit 560 ppm).

entre incertitude et décision, en prenant éventuellement en compte la réduction des incertitudes dans le futur. Deux cas peuvent se distinguer selon que l'on a recours ou non à des distributions (subjectives) de probabilités. La première possibilité est une approche standard d'aide à la décision en présence d'incertitude : on recherche classiquement la stratégie optimale au sens du critère retenu (ici, le moindre coût) pour un jeu de possibles futurs états du monde (Manne et Richels, 2005 ; cette étude). La seconde possibilité, *robust decision-making*, contourne la difficulté de caractériser des distributions de probabilités en situation d'incertitude importante (ou de controverses importantes) : on recherche alors les stratégies robustes (c'est-à-dire très largement insensibles), notamment à court terme, à de nombreuses incertitudes révélées à plus long terme (Hammit *et al.*, 1992 ; Lempert, 2002 ; Lempert *et al.*, 1994 ; Lempert et Schlesinger, 2001 ; Yohe *et al.*, 2004).

De manière générale, quelle que soit l'approche suivie, ces études aboutissent à des conclusions similaires, soulignant l'importance de l'incertitude sur la sensibilité du climat. Par exemple, Caldeira *et al.* (2003) montrent que, si la sensibilité du climat était égale à $+4,5\text{ }^{\circ}\text{C}$, « *one should almost totally reduce emissions by 2050 ; by the turn of the century, almost 75% of the energy supply should be carbon free whatever the value of climate sensitivity* ». Den Elzen et Meinshausen (2005b) concluent que « *[f]or achieving the $2\text{ }^{\circ}\text{C}$ target with a probability of more than 60%, greenhouse gas concentrations need to be stabilized at 450 ppm CO_2 -equivalent or below, if the 90% uncertainty range for climate sensitivity is believed to be 1.5 to $4.5\text{ }^{\circ}\text{C}$* ». Kriegler et Bruckner (2004) en viennent à des conclusions similaires : plus le seuil de réchauffement jugé dangereux est fixé à une valeur basse et plus la valeur de la sensibilité du climat est élevée (deux conditions qui impliquent des plafonds de concentration très bas), plus le budget carbone est contraint (voir aussi Lempert *et al.*, 1994 ; Hammit *et al.*, 1992). Ces études insistent aussi sur les conséquences de retarder les efforts de réduction des émissions : « *[...] the next 5 to 15 years might determine whether the risk of overshooting $2\text{ }^{\circ}\text{C}$ can be limited to a reasonable range* » (Meinshausen, 2005). Sur la base des distributions de probabilités publiées pour la valeur de la sensibilité du climat, Mastrandrea et Schneider (2004) ont comparé les distributions de probabilités de réchauffement induit pour deux scénarios de stabilisation ultime à 550 ppm, l'un d'eux comprenant un dépassement temporaire du plafond. Ils trouvent que, de 2000 à 2200, le scénario de dépassement accroît de 70 % la probabilité de dépassement temporaire ou durable du seuil de $+2\text{ }^{\circ}\text{C}$ par rapport à l'ère préindustrielle. Hare et Meinshausen (2004) ont calculé que chaque décennie de retard dans l'action conduit à un réchauffement supplémentaire de $0,2$ - $0,3\text{ }^{\circ}\text{C}$ sur 100-400 ans. Yohe *et al.* (2004) concluent finalement : « *[...] uncertainty [about climate*

sensitivity] is the reason for acting in the near term and uncertainty cannot be used as a justification for doing nothing. »

Nous nous proposons ici de poursuivre les analyses coût-efficacité des politiques climatiques en introduisant des contraintes faisant référence, non plus aux concentrations, mais à l'évolution de la température moyenne globale (son amplitude et son rythme). Nous nous concentrons sur la réponse de court terme, c'est-à-dire les politiques de réduction des émissions de GES jusqu'en 2050, durée à rapprocher de la cinquantaine d'années que prendra au minimum la refonte des systèmes énergétiques vers des sociétés à bas profil d'émissions. Nous explorons trois questions :

1. La présence d'incertitude sur la dynamique du climat et la définition des risques climatiques conduit-elle à des recommandations très contraignantes ? Autrement dit, une référence au principe de précaution implique-t-elle d'importants efforts d'abattement tant que la connaissance scientifique n'a pas progressé ?
2. L'apprentissage exerce-t-il une influence sur la décision de court terme ? Autrement dit, peut-on se permettre d'attendre, pour réduire les émissions, de disposer de davantage d'informations, et jusqu'à quand ?
3. Est-il possible de hiérarchiser ces incertitudes, en particulier vis-à-vis de la décision de court terme ?

Le cadre d'analyse que nous utilisons (décision séquentielle avec arrivée d'information, que très peu d'analyses en ce domaine ont jusqu'à présent suivi) est ainsi similaire à celui utilisé par Manne et Richels (2005). Il existe cependant deux différences : premièrement, nous considérons une contrainte sur le rythme du réchauffement ; deuxièmement, nous calculons la valeur de l'information pour hiérarchiser les incertitudes auxquelles nous faisons face et pour évaluer l'influence sur la décision de la date d'arrivée de l'information.

La première section est consacrée à la présentation de RESPONSE_0, un modèle coût-efficacité d'optimisation des politiques de réduction des émissions de CO_2 , sous contraintes d'évolution du climat, que nous employons pour ces exercices numériques. Dans la deuxième section, nous revisitons 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 pour les efforts de court terme ? Nous complétons cette analyse dans une troisième section, en étudiant de même l'incertitude sur les deux contraintes climatiques pour être en mesure de hiérarchiser les incertitudes concernant la sensibilité du climat, le niveau et le rythme critiques du changement climatique.

RESPONSE_Θ, un modèle intégré coût-efficacité d'optimisation intertemporelle des politiques de réduction des émissions de CO₂ fossile

Une brève description du modèle

RESPONSE_Θ appartient à la famille RESPONSE (Ambrosi *et al.*, 2003), une famille de modèles intégrés du changement climatique qui relève de la catégorie des modèles d'optimisation des politiques climatiques⁸. Il comprend une représentation du coût des politiques climatiques (volume des émissions et coût de réduction) et une modélisation de la chaîne causale qui va des émissions au changement climatique : passage émissions - concentration et variation de la concentration atmosphérique de CO₂ - changement climatique. La solution du modèle est donnée par la trajectoire temporelle des efforts de réduction des émissions de CO₂, qui minimise le coût actualisé (ici $\rho = 5\%$ par an) des coûts d'abattements sous contraintes d'évolution du climat :

- une contrainte sur l'amplitude du réchauffement : $\Delta\theta_{\max}$ vaut +2 °C, ce qui reste proche de l'objectif retenu par l'Union européenne⁹ ;
- une contrainte de limitation du rythme décennal d'évolution de la température : $\Delta\theta_{\text{RYT}}$ vaut 0,3 °C par décennie dans le cas central. Avec cette contrainte, on insiste sur les risques transitoires, associés à la vitesse du réchauffement climatique et du développement de ses impacts. Peu d'informations sont disponibles en la matière. Les risques le plus clairement identifiés concernent les écosystèmes. (Leemans et Eickhout, 2004 ; WWF, 2000). En étudiant la capacité des arbres à migrer en réponse aux variations du climat sur le quaternaire récent, Krause *et al.* (1989) ont préconisé comme rythme maximum 0,1 °C par décennie. Leemans et Van Vliet (2005) suggèrent même une contrainte à 0,05 °C par décennie. Ce sont là deux recommandations très strictes, surtout quand on les 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 (voir Houghton *et al.*, 2001, Summary of Policymakers, p. 13).

La spécification fonctionnelle des coûts de réduction des émissions est tirée du modèle STARTS (Lecocq, 2000).

⁸ Une présentation détaillée du modèle ainsi que son code (en langage GAMS) sont donnés dans Ambrosi (2004), accessible sur Internet à l'URL : <http://www.centre-cired.fr>

⁹ La référence à l'époque préindustrielle 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^e siècle.

Ils correspondent à des coûts marginaux de réduction des émissions convexes (quadratiques) en fonction du pourcentage de réduction des émissions. Ils prennent en compte un facteur de progrès technique autonome et l'effet de l'inertie socioéconomique comme amplificateur des coûts.

Le modèle du cycle du carbone est tiré des modèles DICE et RICE (Nordhaus et Boyer, 2000). Il 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) ; un compartiment inférieur représentant un océan profond. Les flux de carbone entre ces réservoirs dépendent de coefficients de transfert constants. La demi-vie du carbone atmosphérique est de l'ordre de 50 ans.

L'évolution de la température est représentée au moyen d'un jeu d'équations qui décrivent la variation de la température moyenne globale, depuis un état de référence (période préindustrielle), en réponse au forçage anthropique additionnel induit depuis lors ; c'est donc un modèle de perturbation¹⁰. Le seul GES modélisé est le CO₂. Puisqu'on se concentre sur la réponse du climat à court terme, on néglige à ces échelles de temps la participation de l'océan profond : le modèle décrit les échanges de chaleur entre, d'un côté, l'atmosphère et les surfaces continentales et, de l'autre, l'océan de surface, 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.

La sensibilité du climat : une incertitude-clé

Un des objets de cette étude est d'analyser l'influence sur les politiques climatiques de l'incertitude sur la dynamique du climat. Nous avons considéré ici l'incertitude sur la sensibilité du climat, un indicateur synthétique de la réponse des modèles climatiques. L'incertitude sur ce paramètre 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* » (voir Houghton *et al.*, 2001, chap. IX, p. 561). Depuis, d'importants efforts de recherche ont été entrepris pour mieux caractériser la sensibilité du climat et qualifier l'incertitude associée¹¹. Si, pour l'essentiel, ces

¹⁰ Modèle qui a été développé à l'occasion d'une collaboration entre climatologues et économistes dans le cadre du programme Gestion et impacts du changement climatique (GICC) : « Modélisation intégrée, évaluation des risques climatiques et des politiques de précaution » (réf. 10/99).

¹¹ Pour une revue des différentes méthodes et de leurs limites, voir the National Academies (2003) ou IPCC WGI (2004).

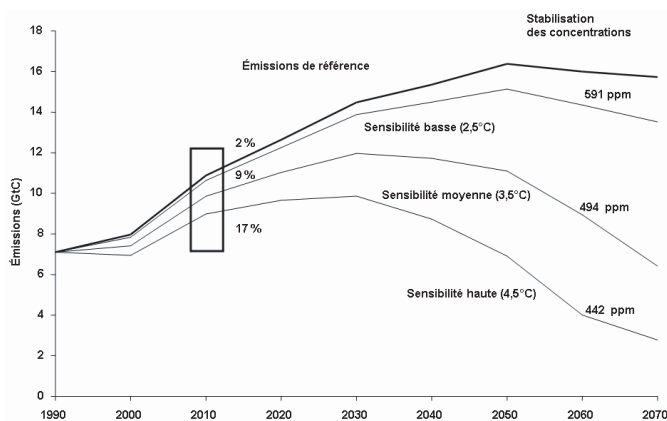


Fig. 1. Sensibilité des trajectoires d'émissions à la sensibilité du climat : résultats de RESPONSE_Θ.

nouvelles estimations restent concentrées sur l'intervalle $+1,5\text{ °C}$ $+4,5\text{ °C}$ avec une moyenne proche de $+3,5\text{ °C}$, elles indiquent néanmoins que l'on ne peut pas exclure des valeurs beaucoup plus importantes pour ce paramètre, certes avec des probabilités faibles. Pour rendre compte de l'incertitude sur la sensibilité du climat dans le modèle RESPONSE, nous explorons trois valeurs, centrées autour de l'estimation moyenne de ce paramètre, $\{+2,5\text{ °C}; +3,5\text{ °C}; +4,5\text{ °C}\}$, et nous avons choisi une distribution symétrique avec les probabilités suivantes $\{1/6; 2/3; 1/6\}$. Cette distribution peut être qualifiée de 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.

En conclusion de cette présentation, examinons les résultats du modèle RESPONSE_Θ, pour un seuil de réchauffement fixé à 2 °C et, pour le moment, sans contrainte de rythme. Nous pouvons constater (Fig. 1) que l'incertitude sur la sensibilité du climat se traduit par des trajectoires optimales d'émissions très différenciées selon sa valeur. C'est donc une incertitude importante pour la décision, notamment à court terme : en 2010, les niveaux d'efforts s'établissent respectivement à 2, 9 et 17 % des émissions de référence selon que la sensibilité du climat occupe sa valeur basse ($+2,5\text{ °C}$), moyenne ($+3,5\text{ °C}$) ou élevée ($+4,5\text{ °C}$). Chercher à respecter les contraintes climatiques implique en fait de stabiliser à long terme la concentration atmosphérique de CO_2 à des plafonds de plus en plus bas plus la sensibilité du climat est élevée, respectivement 591 ppm, 494 ppm et 442 ppm.

Des trajectoires d'émissions contraintes par le rythme à court terme, par l'amplitude à long terme

Analysons maintenant l'influence croisée, sur les recommandations du modèle RESPONSE pour l'action,

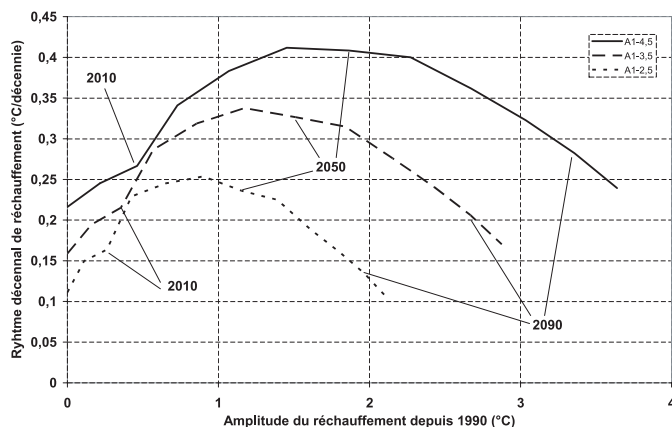


Fig. 2. Diagramme de phase Amplitude du réchauffement (depuis 1990)/ Rythme décennal du réchauffement pour trois valeurs pour la sensibilité du climat.

des deux contraintes climatiques qui encadrent les risques du changement climatique. Pour ce faire, étudions d'abord les trajectoires climatiques de référence du modèle pour différentes valeurs de la sensibilité du climat, afin de comprendre à quel moment les contraintes peuvent s'exprimer et comment leur influence respective varie (Fig. 2).

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 CO_2 . 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 CO_2 , c'est-à-dire, au cycle du carbone près, à la chronique des émissions. L'amplitude des courbes dépend, elle, des valeurs de la sensibilité du climat.

On peut constater que, si la température moyenne globale continue de s'élever au-delà de 2050, cette évolution se produit à un rythme beaucoup moins important qu'au milieu du siècle, car les émissions croissent moins vite au-delà de cet horizon. 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'abatement doivent donc être renforcés dans la première moitié du XXI^e siècle. Les résultats de l'analyse approfondie de sensibilité du modèle sont rassemblés dans le tableau 1, pour ce qui concerne l'abatement pendant la première moitié

Tableau 1. Influence croisée des contraintes climatiques sur les niveaux d'abattement pendant la première moitié du XXI^e siècle.

Δ_{RYT}	$\Delta\theta_{MAX}$		
	1 °C	2 °C	3 °C
0,1 °C par décennie	>	>	>
0,2 °C par décennie	<	>	>
0,3 °C par décennie	<	<	>
0,4 °C par décennie	<	<	<

Le tableau se lit en ligne comme suit : « > » signifie que 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.

du XXI^e siècle, sur lequel porte cette étude. On retrouve des résultats proches des *Tolerable Windows Approach* et *Safe landing Analysis* (voir Metz et al., 2001, chap. X) : contrôler le rythme du changement climatique impose une contrainte importante sur les émissions pendant la première moitié du XXI^e siècle, en particulier quand cette contrainte vaut 0,1 ou 0,2 °C décennie⁻¹.

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. Sur la base des résultats de l'analyse de sensibilité du modèle RESPONSE_Θ, quelle décision d'abattement est optimale à court terme, sachant que, compte tenu de l'incertitude sur la sensibilité du climat, les recommandations du modèle varient de plus d'un facteur 8, par exemple ? 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.

Politique climatique optimale 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

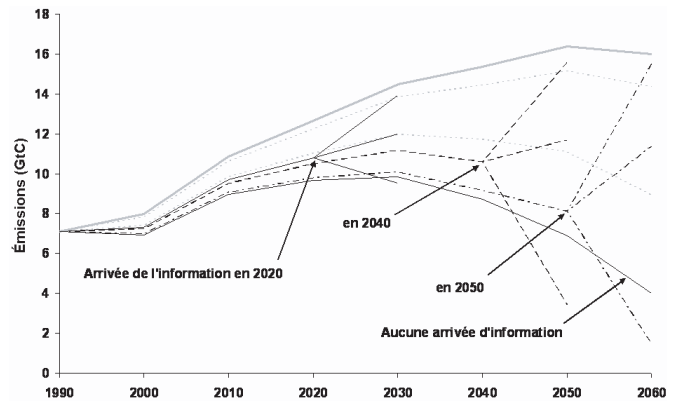


Fig. 3. Apprentissage et flexibilité à court terme.

sensibilité du climat avec arrivée d'information sur ce paramètre, nous avons reformulé le modèle RESPONSE_Θ comme suit. Nous considérons trois états du monde (s), caractérisés par la valeur que peut prendre la sensibilité du climat, {+2,5 °C ; +3,5 °C ; +4,5 °C}. À ces trois états du monde sont associées les probabilités subjectives *ex ante* suivantes (p_s) {1/6 ; 2/3 ; 1/6}. L'apprentissage est ici exogène et se produit à la date t_{info} ; l'information peut être disponible au début de chaque décennie du siècle, avec deux cas polaires, information parfaite (t_{info} = 1990) et incertitude complète (t_{info} = 2300, l'horizon du modèle).

Le modèle recherche la trajectoire optimale d'émissions, sachant que l'incertitude sur la sensibilité du climat sera levée à la date t_{info} : après cette date, on peut adapter la politique climatique selon l'information obtenue (comme on envisage trois états du monde, il y a trois profils d'émissions différents) ; avant cette date, on 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. L'objectif du modèle est la minimisation de l'espérance sur les trois états du monde de la somme actualisée des coûts d'abattement, en respectant une contrainte sur l'amplitude du réchauffement et une contrainte sur son rythme décennal.

En l'absence d'information, une stratégie de précaution très contraignante à court terme

Examinons dans un premier temps nos résultats en l'absence d'information sur la sensibilité du climat (t_{info} = 2300). En présence d'incertitude complète (Fig. 3), la trajectoire optimale d'émissions est confondue avec le pire des cas certains (sensibilité du climat à 4,5 °C), engendrant par là des regrets économiques significatifs (dépenses d'abattement in fine inutiles et souvent difficilement recouvrables) s'il s'avère que la sensibilité du climat prend en fait une valeur plus basse. Autrement dit, les résultats sont identiques à ceux qui seraient obtenus

pour un critère de décision de type « Maximin », qui ne considère que le pire des cas. Ceci s'explique par le fait que le formalisme coût-efficacité impose, quel qu'en soit le coût, de respecter les contraintes environnementales : on observe donc une attraction complète par le pire des cas certains, correspondant au plafond de stabilisation le plus bas (442 ppm).

Le rôle déterminant de l'apprentissage : flexibilité à court terme des efforts d'abattement

On peut, en revanche, relâcher dans une certaine mesure les efforts de réduction des émissions et diminuer par là les regrets économiques dès lors que l'on prend en compte l'éventualité de l'arrivée d'information. Cet effet est d'autant plus marqué que l'apprentissage se produit tôt. Ainsi, en 2010, les efforts passent respectivement de 17 % des émissions de référence à 16, 12 et 11 % respectivement selon que l'information n'arrive jamais ou qu'elle arrive en 2050, 2040 et 2020. On retrouve ici des résultats semblables à ceux mis en évidence par Ha Duong, Grubb et Hourcade (1997) dans le contexte de la stabilisation des concentrations atmosphériques des GES. Respecter un seuil de réchauffement en présence d'incertitude sur la sensibilité du climat est, en effet, presque similaire à un problème de stabilisation des concentrations à des plafonds encore inconnus. Il n'est cependant pas certain qu'une telle information soit disponible rapidement : au moins une cinquantaine d'années pourrait être nécessaire (Kelly *et al.*, 2000), ce qui implique finalement de suivre une politique relativement contraignante à court terme.

Des regrets significatifs à court terme, avec la contrainte de rythme

Mais cet effet est presque annulé à court terme par la contrainte de rythme, même lorsqu'elle n'est pas stricte. En effet, la contrainte sur le rythme du réchauffement induit des efforts significatifs à court terme, presque confondus avec le pire des cas certains, et ne permet pas d'exploiter l'acquisition future d'information pour la décision (voir Fig. 4, pour une contrainte de rythme valant maintenant 0,3 °C par décennie). Autrement dit, en présence d'incertitude sur la sensibilité du climat, le rôle de la contrainte de rythme sur le niveau d'efforts à court terme est magnifié, car est prise en compte l'hypothèse d'une sensibilité du climat valant finalement +4,5 °C, induisant un réchauffement plus intense et plus rapide.

Ces conclusions (résultat non présenté ici) sont robustes aux croyances du décideur, c'est-à-dire sa distribution de probabilité subjective associée à l'incertitude sur la sensibilité du climat. En plus d'une croyance centrée, nous avons testé une croyance neutre, qui correspond à une application du principe des raisons insuffisantes

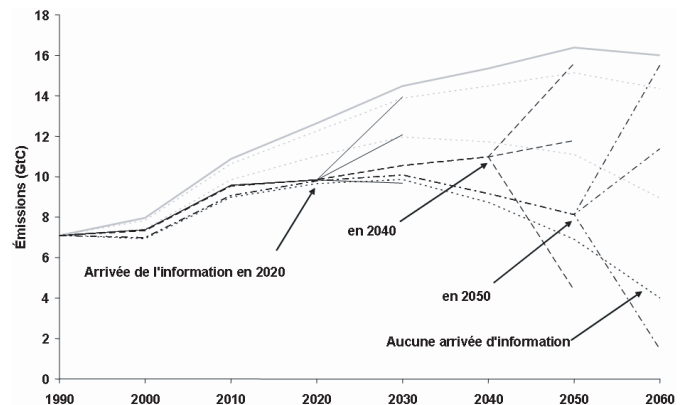


Fig. 4. Des regrets à court terme significatifs avec la contrainte de rythme.

(distribution équiprobable de moyenne 3,5 °C : {1/3; 1/3; 1/3}), une croyance optimiste (distribution concentrée à gauche, de moyenne +3 °C : {2/3; 1/6; 1/6}) et une croyance pessimiste (distribution concentrée à droite, de moyenne +4 °C : {1/6; 1/6; 2/3}).

Ces conclusions sont robustes à l'actualisation, qui, en univers certain (résultats de l'analyse de sensibilité non présentés ici), est le paramètre d'ordre socioéconomique le plus déterminant pour la décision, jouant dans le sens d'un report des efforts vers le futur. Ce qu'on retrouve bien dans le tableau 2. En univers certain, la réponse du modèle est très nettement différenciée selon les valeurs du taux d'actualisation (qui joue dans le sens d'un effet retard). 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 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.

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 du taux de croissance du scénario de référence et des hypothèses classiques sur les préférences), impliquant

Tableau 2. Impact du taux d'actualisation sur la décision optimale, en univers certain et en présence d'incertitude avec arrivée d'information sur la sensibilité du climat.

Taux d'actualisation (% par an)	Niveau optimal d'abattement en 2020 (% des émissions de référence)	
	Univers certain	Arrivée d'information en 2020
1	27,3	28,0
3	18,1	22,1
5	12,8	21,9
10	6,0	21,6

dans ce cas unanimement un effort de réduction des émissions de 22 %.

Ainsi, l'incertitude sur la sensibilité du climat est cruciale : sa prise en compte implique de suivre des trajectoires d'émissions très contraignantes à court terme, en particulier si l'information arrive tard (voire jamais) ou sous l'effet de la contrainte de rythme (sans même qu'elle soit nécessairement stricte). Or, cette contrainte, comme celle sur l'amplitude du changement climatique, est encore incertaine : certains plaideront pour une valeur très faible, mais d'autres, qu'ils accordent moins d'importance à la sauvegarde des écosystèmes ou soient très optimistes sur nos capacités d'adaptation, argueront pour une contrainte plus lâche. Pour hiérarchiser ces trois incertitudes selon les temps de la décision, nous proposons de calculer la valeur de l'information attachée à chacun de ces paramètres.

Hiérarchisation des incertitudes vis-à-vis de la politique climatique optimale

La valeur de l'information, *Expected Value of Perfect Information* (EVPI), mesure l'opportunité de disposer d'une information pour l'incorporer dans la décision. Comme nous nous plaçons dans une perspective temporelle, nous la calculons comme le consentement maximal à payer pour disposer aujourd'hui d'une information plutôt qu'attendre une date ultérieure.

Le niveau atteint par EVPI permet de hiérarchiser l'importance, pour le décideur d'aujourd'hui, d'un ensemble de variables incertaines. Par exemple, la valeur à l'infini, EVPI (2300), mesure l'ampleur des regrets venant du fait de ne jamais avoir à disposition l'information pour l'intégrer dans les stratégies de précaution. C'est ainsi une évaluation du coût de l'incertitude absolue et du montant que l'on serait prêt à payer aujourd'hui pour acquérir immédiatement (plutôt que jamais) les connaissances nécessaires afin d'ajuster les politiques climatiques. Il est également intéressant d'examiner le profil

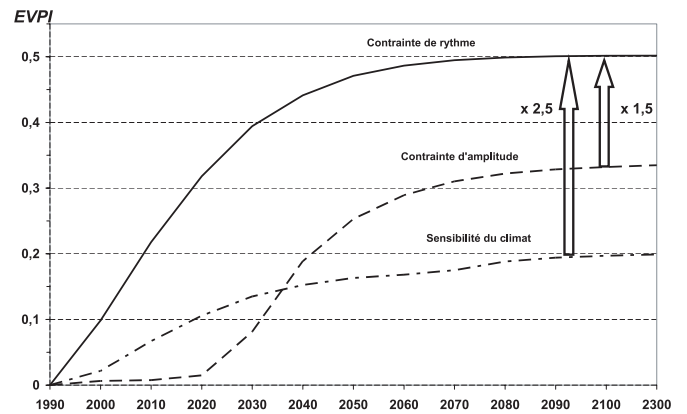


Fig. 5. Valeur de l'information, en fonction de sa date d'arrivée, sur la sensibilité du climat, le rythme et l'amplitude critiques du réchauffement.

temporel d'EVPI, qui montre l'opportunité d'accélérer la résolution des incertitudes : si, entre deux dates, cette grandeur croît beaucoup, c'est qu'il est crucial pour le décideur d'obtenir l'information au début de cette période.

Nous explorons comme valeurs pour la sensibilité du climat le triplet $\{+2,5\text{ }^\circ\text{C}; +3,5\text{ }^\circ\text{C}; +4,5\text{ }^\circ\text{C}\}$, pour la contrainte d'amplitude, le triplet $\{+1\text{ }^\circ\text{C}; +2\text{ }^\circ\text{C}; +3\text{ }^\circ\text{C}\}$ et pour la contrainte de rythme, le triplet $\{0,1\text{ }^\circ\text{C par décennie}; 0,2\text{ }^\circ\text{C par décennie}; 0,3\text{ }^\circ\text{C par décennie}\}$. Nous retenons la distribution de probabilités subjectives suivante : $\{1/3; 1/3; 1/3\}$.

On retrouve (Fig. 5) le rôle prédominant de la contrainte de rythme. C'est en effet à la contrainte de rythme qu'est associée la plus forte valeur de l'information : c'est celle 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 la valeur à l'infini est la plus élevée (2,5 fois supérieure à EVPI pour la sensibilité du climat et 1,5 fois supérieure à EVPI pour la contrainte d'amplitude). Les dominances respectives des deux autres paramètres changent : EVPI pour la sensibilité du climat est supérieure jusqu'en 2035 à EVPI pour la contrainte d'amplitude, et la situation s'inverse ensuite (en 2100, ces deux valeurs sont dans un rapport 1,7).

On trouve ainsi qu'en termes de gain de flexibilité, il y a une opportunité très importante à connaître avant 2040 les valeurs de la contrainte sur le rythme du réchauffement, de la sensibilité du climat et de la contrainte sur l'amplitude du réchauffement, 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 bénéfice à découvrir les valeurs, avérées ou socialement souhaitables, de ces paramètres ; mais, en termes de flexibilité pour le niveau d'efforts à court terme, l'acquisition d'information à ces périodes n'est plus aussi cruciale (on est en effet obligé de suivre une trajectoire proche, voire confondue, avec le pire des cas certains).

En termes d'encadrement des risques climatiques à partir d'indicateurs de l'évolution de la température moyenne globale, les informations les plus cruciales concernent le rythme critique de réchauffement socialement acceptable – autrement dit, une caractéristique transitoire des risques – et, dans un second temps, le niveau critique de réchauffement – autrement dit, une contrainte de long terme.

Conclusion

Nos résultats montrent qu'il existe un coût d'opportunité élevé à ne pas connaître la valeur de la sensibilité du climat pendant la première moitié du XXI^e 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 ce paramètre. Or, les perspectives d'apprentissage étant pour le moment relativement pessimistes (de l'ordre d'une cinquantaine d'années), les efforts à court terme doivent être relativement importants. En définitive, un objectif comme +2 °C pourrait impliquer une contrainte très lourde sur les émissions, compte tenu de l'incertitude sur la sensibilité du climat.

En outre, en passant d'une définition des risques climatiques à partir des plafonds de stabilisation souhaitables de la concentration atmosphériques de CO₂ à une définition, plus tangible, en termes de protection globale à long terme (amplitude du réchauffement) et de protection transitoire (contrainte sur son rythme décennal), 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 par décennie. 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. Il est donc urgent de poursuivre l'effort de recherche sur les risques du changement climatique, afin de caractériser un garde-fou acceptable pour limiter le rythme du réchauffement.

Références

- Alcamo, J., Kreileman, E., 1996. Emissions scenarios and global climate protection, *Global Environmental Change*, 6, 4, 305-334.
- Ambrosi, P., 2004. *Amplitude et calendrier des politiques de réduction des émissions en réponse aux risques climatiques : leçons des modèles intégrés*. Thèse en économie de l'environnement, EHESS, Paris.
- Ambrosi, P., Hourcade, J.-C., Hallegatte, S., Lecocq, F., Dumas, P., Ha Duong, M., 2003. Optimal control models and elicitation of attitudes towards climate damages, *Environmental Modeling and Assessment*, 8, 3, 133-147.
- Ambrosi, P., Courtois, P., 2004. Impacts du changement climatique et modélisation intégrée, la part de l'arbitraire, *Natures Sciences Sociétés*, 12, 4, 375-386.
- Böhringer, C., Löschel, A., Rutherford, T.F., à paraître. Efficiency Gains from "What"-Flexibility in Climate Policy – An Integrated CGE Assessment, *The Energy Journal*.
- Caldeira, K., Jain, A.K., Hoffert, M.I., 2003. Climate sensitivity uncertainty and the need for energy without CO₂ emission, *Science*, 299, 5615, 2052-2054.
- Council of the European Union, 2004. *Press Release: 2632nd Council Meeting*, Brussels (Belgium), Council of the European Union.
- Den Elzen, M.G.J., Meinshausen, M., 2005a. Emission implications of long-term climate targets. Communication au colloque *Avoiding Dangerous Climate Change*, Exeter (UK), DEFRA & Met Office, 1-3 February.
- Den Elzen, M.G.J., Meinshausen, M., 2005b. *Meeting the EU 2 °C climate target: global and regional emission implications*, Bilthoven (the Netherlands), Netherlands Environmental Assessment Agency (MNP associated the RIVM).
- ECF, 2004. *What Is Dangerous Climate Change? Initial Results of a Symposium on Key Vulnerable Regions, Climate Change and Article 2 of the UNFCCC*, ECF and PIK.
- European Commission, 1996. *Communication on Community Strategy on Climate Change: Council Conclusions*, Brussels (Belgium), European Commission.
- Ha Duong, M., Grubb, M., Hourcade, J.-C., 1997. Influence of socioeconomic inertia and uncertainty on optimal CO₂-emission abatement, *Nature*, 390, 270-274.
- Hammitt, J.K., Lempert, R.J., Schlesinger, M.E., 1992. A sequential-decision strategy for abating climate change, *Nature*, 357, 315-318.
- Hare, B., Meinshausen, M., 2004. *How Much Warming Are We Committed To and How Much Can Be Avoided?*, Potsdam, Potsdam Institute for Climate Impact Research (PIK).
- Hitz, S., Smith, J., 2004. Estimating global impacts from climate change, in Morlot, J.C., Agrawala, S. (Eds), *The Benefits of Climate Change Policies: Analytical and Framework Issues*, Paris, OECD, 31-82.
- Houghton, J.T., Ding, Y., Griggs, D.J., Noguer, P.J., Van der Linden, P.J., Dai, X., Maskell, K., Johnson, C.A. (Eds), 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, Cambridge University Press.
- International Climate Change Taskforce, 2005. *Meeting the Climate Challenge: Recommendations of the International Climate Change Taskforce*.
- IPCC WGI, 2004. *Workshop on Climate Sensitivity*, Paris, IPCC.
- Kelly, D., Kolstad, C.D., Schlesinger, M.E., Andronova, N.G., 2000. *Learning about Climate Sensitivity From the Instrumental Temperature Record*. Working paper, available: <http://homer.bus.miami.edu/~dkelly/papers/kksa.pdf>
- Knutti, R., Stocker, T.F., Joos, F., Plattner, G.-K., 2003. Probabilistic climate change projections using neural networks, *Climate Dynamics*, 21, 257-272.
- Krause, F., Bach, W., Koomey, J., 1989. Energy policy in the greenhouse (Final report), in *From Warming Fate to Warming Limit: Benchmarks for a Global Climate Convention*, El Cerrito, International Project for Sustainable Energy Paths (IPSEP).

- Kriegler, E., Bruckner, T., 2004. Sensitivity analysis of emissions corridors for the 21st century, *Climatic Change*, 66, 3, 345-387.
- 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 en sciences de l'environnement, ENGREF, Paris.
- Leemans, R., Eickhout, B., 2004. Another reason for concern: regional and global impacts on ecosystems for different levels of climate change, *Global Environmental Change*, 14, 219-228.
- Leemans, R., Van Vliet, A., 2005. Responses of species to changes in climate determine climate protection targets. Communication au colloque *Avoiding Dangerous Climate Change*, Exeter (UK), DEFRA & Met Office, 1-3 February.
- Lempert, R. J., 2002. A new decision sciences for complex systems, *PNAS*, 99, suppl. 3, 7309-7313.
- Lempert, R.J., Schlesinger, M.E., Hammitt, J.K., 1994. The impact of potential abrupt climate changes on near-term policy choices, *Climatic Change*, 24, 351-376.
- Lempert, R.J., Schlesinger, M.E., 2001. Climate-change strategy needs to be robust, *Nature*, 412, 375.
- Manne, A.S., Richels, R., 2005. Global climate decisions under uncertainty, *International Energy Workshop 2005*, Kyoto, Palulu Plaza Kyoto, 5-7 July.
- Mastrandrea, M.D., Schneider, S.H., 2004. Probabilistic integrated assessment of 'dangerous' climate change, *Science*, 304, 5670, 571-575.
- McCarthy, J.J., Canziani, O.F., Leary, N.A., Dokken, D.J., White, K. S. (Eds), 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, Cambridge University Press.
- Meehl, G.A., Washington, M.A., Collins, W.D., Arblaster, J.M., Hu, A., Buja, L.E., Strand, W.G., Teng, H., 2005. How much more global warming and sea level rise?, *Science*, 307, 5716, 1769-1772.
- Meinshausen, M., 2005. On the risk of overshooting +2 °C. Communication au colloque *Avoiding Dangerous Climate Change*, Exeter (UK), DEFRA & Met Office, 1-3 February.
- Metz, B., Ogunlade, D., Swart, R., Pan, J. (Eds), 2001. *Climate Change 2001: Mitigation. Contribution of Working Group III to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, Cambridge, Cambridge University Press.
- National Academies, 2003. *Estimating Climate Sensitivity: Report of a workshop*, Washington (DC), Steering Committee on Probabilistic Estimates of Climate Sensitivity, Board on Atmospheric Sciences and Climate, Division of Earth and Life Studies, the National Academies.
- Nordhaus, W., Boyer, J.G., 2000. *Warming the World: Economics Models of Climate Change*, Cambridge, MIT Press.
- O'Neill, B.C., Oppenheimer, M., 2004. Climate change impacts are sensitive to the concentration stabilisation path, *PNAS*, 1001, 47, 16411-16417.
- Parry, M., Arnell, N., McMichael, T., Nicholls, R., Martens, P., Kovats, S., Livermore, M., Rosenzweig, C., Iglesias, A., Fischer, G., 2001. Millions at Risk: defining critical climate change threats and targets, *Global Environmental Change*, 11, 181-183.
- Richels, R., Manne, A.S., Wigley, T.M.L., 2004. *Moving Beyond Concentrations: The Challenge of Limiting Temperature Change*. Document de travail 04-11, Washington (DC), AEI-Brookings Joint Center for Regulatory Studies.
- Swart, R., Berk, M., Janssen, M., Kreileman, E., Leemans, R., 1998. The safe landing approach: risks and trade-offs in climate change, in Alcamo, J., Leemans, R., Kreileman, E. (Eds), *Global Change Scenarios of the 21st Century: Results from the IMAGE 2.1 Model*, Oxford, Pergamon/Elsevier Science, 193-218.
- Toth, F.L., Bruckner, T., Füssel, H.-M., Leimbach, M., Petschel-Held, G., 2003a. Integrated assessment of long-term climate policies: Part 1. Model Presentation, *Climatic Change*, 56, 1-2, 37-56.
- Toth, F.L., Bruckner, T., Füssel, H.-M., Leimbach, M., Petschel-Held, G., 2003b. Integrated assessment of long-term climate policies: Part 2. Model results and uncertainty analysis, *Climatic Change*, 56, 1-2, 57-75.
- UNFCCC, 1992. *United Nations Framework Convention on Climate Change*.
- Warren, R., 2005. Impacts of global climate change at different annual mean global temperature increases. Communication au colloque *Avoiding Dangerous Climate Change*, Exeter (UK), DEFRA & Met Office, 1-3 February.
- Wigley, T.M.L., 2005. The climate change commitment, *Science*, 307, 5716, 1766-1769.
- WWF, 2000. *Global Warming and Terrestrial Biodiversity Decline*, Gland, WWF.
- Yohe, G., Andronova, N.G., Schlesinger, M.E., 2004. To hedge or not against an uncertain climate future?, *Science*, 306, 5695, 416-417.

Reçu le 15 mars 2005. Accepté le 9 mars 2006.