

# **SESSION SPECIALE A HAUT NIVEAU DE L'EPOC SUR LES COUTS DE L'INACTION**

LES COUTS DE L'INACTION FACE AU CHANGEMENT CLIMATIQUE :  
DOCUMENT DE REFERENCE PREPARE PAR WILLIAM R. CLINE  
(CONSULTANT)

14 avril 2005

Le contenu de ce document relève de la responsabilité de l'auteur. Le document a été commandé uniquement dans l'optique des échanges de vues. Les opinions et les informations qui y sont présentées ne reflètent pas celles de l'Organisation ou de ses pays membres, ni n'ont été approuvées par l'Organisation ou ses pays membres.

# Les coûts de l'inaction face au changement climatique<sup>1</sup>

William R. Cline  
Center for Global Development et  
Institute for International Economics

## Introduction

1. Meinshausen (2004) note que “la fonte de la nappe glaciaire du Groenland pourrait être déclenchée par [une augmentation par rapport au niveau préindustriel] des températures locales d'environ 2.7°C ... ce qui peut correspondre à [une hausse] des températures moyennes globales de moins de 2°C. Cette fonte est de nature à provoquer une élévation du niveau de la mer de 7 mètres au cours des 1 000 prochaines années ou au-delà ...” Hare et Meinshausen (2004) considèrent que même dans le “scénario d'émission le plus bas jugé possible”, le réchauffement global moyen atteindra 1.9°C d'ici 2050 avant de se stabiliser à ce niveau.

2. L'élévation du niveau de la mer sur un millénaire constitue peut-être la meilleure illustration du clivage potentiel entre la majorité apparente des spécialistes des sciences physiques, très préoccupés par la question, et un groupe non négligeable d'économistes plus sereins quant à l'urgence de limiter le changement climatique. Pour de nombreux scientifiques, une hausse de 7 mètres du niveau de la mer sur une période de 1 000 ans constituerait sans doute une “interférence anthropique dangereuse” avec l'atmosphère (un des critères d'intervention définis dans la Convention-cadre des Nations Unies sur les changements climatiques de 1992). En revanche, certains économistes pourraient penser qu'il est tout à fait possible de faire abstraction d'effets aussi distants en raison de l'évolution des techniques et de l'impact de l'actualisation.<sup>2</sup>

3. La prise en compte du risque est un autre élément critique de l'analyse. Les craintes des scientifiques accordent implicitement une place considérable au risque d'effets catastrophiques non linéaires, comme l'arrêt de la circulation thermohaline dans l'Atlantique Nord (qui réchauffe l'Europe septentrionale), et divers phénomènes "d'emballement de l'effet de serre" faisant intervenir de forts mécanismes de rétroaction positive (par exemple, libération de méthane par déstabilisation des clathrates et moindre absorption du CO<sub>2</sub> par les océans réchauffés). D'autres scénarios aboutissant à un relèvement du niveau de la mer de “6 m en quelques centaines d'années” se classeraient aussi parmi les scénarios catastrophe aux yeux de certains (Oppenheimer et Alley, 2004). Les analyses coûts-bénéfices ont tendance à ne mentionner que pour la forme les événements peu probables aux conséquences très lourdes, et à les exclure de leurs calculs.<sup>3</sup> De plus en plus, cependant, les principaux choix en matière de politique climatique semblent porter sur les actions à entreprendre en vue de réduire le risque que de tels événements se produisent, et non à évaluer les répercussions des changements entraînés par un réchauffement progressif.

---

<sup>1</sup> Tout en acceptant que le document fasse l'objet d'une plus large diffusion, certains pays membres émettent de fortes réserves sur son contenu.

<sup>2</sup> Par exemple, Stokey (2004) suggère d'appliquer un taux d'actualisation annuel de 5 % pour évaluer le réchauffement planétaire. Dans cette hypothèse, 1 milliard USD de dommages dans 100 ans ne représentent que 7.6 millions USD aujourd'hui ; 1 milliard USD dans 300 ans ne représentent que 440 USD aujourd'hui ; et 1 milliard USD dans un millénaire ne représentent pratiquement rien aujourd'hui.. On notera, en outre, que si une augmentation de 2°C peut être considérée comme une interférence anthropique dangereuse en raison du risque de montée du niveau des mers, certains économistes semblent penser qu'un réchauffement de cette ampleur produirait des effets favorables plutôt que des dommages (Mendelsohn, 2004).

<sup>3</sup> Les estimations de dommages figurant dans Nordhaus et Boyer (2000) constituent une exception importante, comme on le verra plus loin.

4. Le présent document examine tout d'abord les principaux arbitrages à opérer pour établir le calendrier de l'action des pouvoirs publics face au changement climatique. Il procède ensuite à un tour d'horizon des études économiques publiées sur les coûts et bénéfices de la réduction des émissions. Pour terminer, il propose une estimation des coûts économiques potentiels susceptibles de découler d'un report des mesures, à partir de l'analyse de Cline (2004a).

5. Dans les calculs spécifiques de ce document, les coûts de l'inaction sont précisés de deux manières différentes. Selon la première formulation, probablement la plus pertinente, on suppose que l'inaction persiste pendant deux décennies seulement. Les coûts de l'inaction sont alors calculés comme les dommages découlant de la poursuite du changement climatique au-delà de celui correspondant à la trajectoire optimale de réduction définie par Cline (2004a), du fait qu'aucune mesure de réduction n'aura été mise en œuvre au cours des deux premières décennies, déduction faite des économies représentées par les coûts ainsi évités. Selon la seconde formulation, plus extrême, l'inaction est supposée permanente (c'est-à-dire qu'aucune réduction des émissions n'est jamais opérée par rapport à la trajectoire de référence). Dans ce cas, les coûts de l'inaction correspondent là aussi aux coûts nets des dommages futurs causés par le changement climatique, déduction faite des économies réalisées du fait de l'absence de mesures de réduction des émissions, mais cette fois sur la totalité de la période de trois siècles considérée.

### ***Inaction des pouvoirs publics, report des mesures de réduction et efficacité***

6. Le Protocole de Kyoto est désormais devenu une réalité après avoir été ratifié par 141 pays dont la Russie, grâce à laquelle le total des émissions des pays signataires a dépassé le seuil nécessaire pour que le traité entre en vigueur. Les 35 pays industrialisés signataires se sont engagés à ramener leurs émissions de gaz à effet de serre, d'ici 2012, à un niveau inférieur de 5 % en moyenne à celui de 1990. En revanche, les Etats-Unis (ainsi que l'Australie) n'ont pas ratifié le Protocole en raison des coûts économiques qu'il entraîne et parce que de grands pays émetteurs comme la Chine et l'Inde ne sont pas soumis aux restrictions prévues par le traité.

7. Pour faire face au changement climatique, les Etats-Unis misent sur la recherche technologique. Leurs dépenses publiques dans ce domaine s'élèvent à 4.5 milliards USD par an (Abraham, 2003). Dans ce contexte, la recherche consacrée à la technologie des piles à combustible à hydrogène absorbera 1.7 milliard USD sur cinq ans, et le projet FutureGen de construction de la première centrale au charbon sans émission de carbone, qui repose sur le principe de la séquestration du carbone, 1 milliard USD sur 10-15 ans.

8. L'idée d'ajourner les mesures de réduction de la pollution jusqu'à ce que la recherche permette l'apparition de nouvelles technologies, et afin d'éviter la mise à la retraite prématurée des équipements, a bénéficié du soutien intellectuel de certains spécialistes, notamment Manne (1992).<sup>4</sup> Un inconvénient important de cette approche tient cependant au fait qu'en omettant tout signal de prix direct (comme une taxe sur le carbone) qui pourrait encourager les entreprises à se détourner des technologies basées sur le carbone, elle sacrifie sans doute toute possibilité de changement technique endogène (c'est-à-dire en réaction à l'évolution des prix).<sup>5</sup>

---

<sup>4</sup> Pour Manne, cette stratégie d'ajournement, qui revient à "apprendre puis agir", s'oppose à la stratégie de couverture des risques qui consiste à prendre immédiatement des mesures de réduction des émissions et à "agir puis apprendre".

<sup>5</sup> On notera en outre que l'effort de recherche d'environ 5 milliards USD par an, soit 0.04 % du PIB, est environ dix fois inférieur au niveau optimal des crédits qu'il faudrait consacrer à la lutte contre le changement climatique pour les 10 ou 20 premières années (Cline, 2004a). Dans cette étude, le résultat optimal à obtenir au cours des 10 à 20 premières années correspond à une réduction des émissions de 40 % environ par rapport au scénario de référence, pour un coût économique initial de un demi pour cent environ du PIB.

9. Le principal risque de l'ajournement, bien entendu, est de voir l'accumulation dans l'atmosphère de dioxyde de carbone (et d'autres gaz à effet de serre) atteindre un niveau considéré par beaucoup comme très dangereux avant que les pouvoirs publics passent de "l'apprentissage" à "l'action". Plus précisément, le niveau d'émission de carbone de référence appliqué par Cline (2004a) dans le scénario "au fil de l'eau" passe de 8.6 milliards de tonnes de carbone (GtC) en 2005 à 11.6 GtC en 2025. Compte tenu des émissions cumulées de 202 GtC, il est probable que 101 GtC résideraient dans l'atmosphère (le taux de rétention atmosphérique étant d'environ 50 %). La concentration de carbone passerait alors de 376 parties par million (ppm) en 2003 (Keeling et Whorf, 2005) à 424 ppm en 2025.<sup>6</sup> Si l'on tient compte des autres gaz à effet de serre, on aboutirait à une concentration totale de 490 ppm d'équivalent carbone.<sup>7</sup> A cette concentration, la probabilité moyenne de dépasser 2°C de réchauffement serait d'environ 62 %.<sup>8</sup> C'est pourquoi, si un tel seuil est jugé hautement indésirable, deux décennies seraient sans doute trop longues pour apprendre avant d'agir.

10. Si l'on suppose au contraire qu'un programme offensif de lutte contre le changement climatique vise à maintenir les émissions à un niveau de 4 GtC par an (comme le suggère Cline, 1992), sur deux décennies, la concentration atmosphérique n'atteindrait probablement que 390 ppm environ.<sup>9</sup> Avec une concentration totale d'équivalent carbone de 450 ppm, par exemple, la probabilité d'un réchauffement supérieur à 2°C ne serait plus que de 47 % (Meinshausen, 2004), ce qui reste trop élevé pour beaucoup mais laisse un peu plus d'une chance sur deux de demeurer sous ce plafond.

11. L'idée générale est qu'en ajournant les mesures de réduction des émissions pour privilégier la recherche, on augmente la probabilité d'atteindre des seuils climatiques que certains pourraient considérer comme dangereux. On risque aussi d'imposer des coûts de "rattrapage" très élevés au cours des décennies ultérieures, compte tenu des réductions plus fortes des émissions qu'il pourrait devenir nécessaire d'opérer afin de limiter les concentrations atmosphériques (Cline, 2004b).<sup>10</sup>

### ***Coûts et bénéfices de la lutte contre le changement climatique : tour d'horizon succinct***

12. Une façon d'aborder la politique climatique consiste à définir des seuils de concentrations et de changement climatique considérés comme dangereux, puis à chercher le moyen le moins coûteux de

---

<sup>6</sup> Ce calcul est basé sur la relation entre une concentration de carbone de 353 ppm en 1989 et le stock atmosphérique total de 750 GtC à cette époque (Cline, 1992, p. 16). Dans cette hypothèse, le stock atmosphérique représentait 799 GtC en 2003.

<sup>7</sup> Meinshausen (2004) chiffre à 550 ppm d'équivalent carbone le forçage radiatif total dû aux gaz à effet de serre lorsque la concentration de carbone proprement dit est de 475 ppm, ce qui suppose un ratio du forçage total au forçage lié au carbone égal à 1.16.

<sup>8</sup> La probabilité moyenne de parvenir à un réchauffement de plus de 2°C pour une concentration de 550 ppm d'équivalent carbone est estimée par Meinshausen (2004) à 85 % ; pour 450 ppm, elle est de 47 %. L'estimation figurant dans le texte est une interpolation. Le réchauffement effectif se produirait une vingtaine d'années plus tard que la date du réchauffement "prévu", en raison de l'inertie thermique des océans.

<sup>9</sup> Avec une rétention atmosphérique demeurant à 50 %, la concentration atteindrait 395 ppm, mais le taux de rétention diminuerait quelque peu si les émissions étaient réduites dans de telles proportions, compte tenu du transit permanent de l'atmosphère vers les océans et la biosphère.

<sup>10</sup> Dans la mesure où les coûts des mesures de lutte ne sont pas linéaires, le coût total pourrait en effet se révéler beaucoup plus élevé dans le cas d'un scénario selon lequel deux décennies sans mesures de réduction seraient suivies de deux décennies où les émissions sont réduites de 50 % par rapport au niveau de référence, par exemple, que dans celui d'un scénario prévoyant des réductions progressivement de plus en plus fortes, passant par exemple de 20 % dans la première décennie à 30 % dans la quatrième décennie, avec la même quantité totale d'émissions évitées. Dans ces hypothèses, il n'est pas envisagé de mise à la retraite prématurée des équipements.

réduire suffisamment les émissions pour demeurer en deçà de ces seuils. Une autre approche consiste à utiliser l'analyse coûts-bénéfices pour déterminer la politique de réduction optimale. La présente section passe en revue les principales études consacrées à cette dernière approche.

13. D'emblée, il convient de souligner qu'en général, le rôle de l'adaptation est pris en compte de manière plus explicite dans les études plus récentes que dans les premières études. Ainsi, Nordhaus et Boyer (2000) adoptent des estimations moins élevées que dans certaines des études antérieures en ce qui concerne les dommages dans certains domaines comme l'agriculture, l'élévation du niveau des mers et l'énergie, car ils tiennent davantage compte de l'atténuation des dommages grâce aux mesures d'adaptation.

14. *Cline (1992)* – Mon étude initiale soulignait que l'horizon temporel pour l'analyse du réchauffement planétaire était de 300 ans, durée nécessaire pour que les concentrations de dioxyde de carbone amorcent une diminution grâce aux phénomènes de transfert vers l'océan profond (Sundquist, 1990). D'après les projections disponibles à l'époque concernant l'évolution des émissions selon un scénario "au fil de l'eau", j'ai estimé que les émissions atteindraient environ 20 GtC en 2100 et 50 GtC en 2300.

15. En utilisant les données scientifiques fournies dans le premier rapport du GIEC (Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat) (IPCC, 1990), j'ai calculé qu'en l'absence d'action, le réchauffement pourrait à terme atteindre 10°C. Les estimations de l'Agence pour la protection de l'environnement des Etats-Unis et d'autres sources ont permis de calculer qu'en cas de doublement des concentrations de CO<sub>2</sub> (2xCO<sub>2</sub>), accompagné d'un réchauffement de 2.5°C, les dommages pour les Etats-Unis représenteraient 1 % environ du PIB (p. 131). Ces dommages concernent, par ordre d'importance, l'agriculture, les besoins en électricité (l'augmentation de la consommation pour la climatisation excédant la diminution des besoins pour le chauffage électrique) ; les ressources en eau ; l'élévation du niveau des mers ; les pertes de vies humaines ; la pollution due à l'ozone troposphérique ; la disparition d'espèces, et la diminution du couvert forestier, ainsi que d'autres catégories marquées par des effets moins importants. J'ai appliqué une fonction modérément non linéaire pour parvenir à une estimation centrale des dommages correspondant à 6 % du PIB pour un réchauffement de 10°C.

16. L'analyse a ensuite consisté à déterminer les coûts de réduction à partir d'un examen des modèles ascendants et descendants disponibles à l'époque. Après une phase de réduction à faible coût grâce à des gains d'efficacité et des programmes de boisement, on a estimé que le coût d'une réduction supplémentaire des émissions se situerait entre 100 USD et un plafond de 250 USD par tonne de carbone. J'ai procédé à l'actualisation des coûts et bénéfices pour la collectivité, en convertissant tous les effets en "équivalents consommation" puis en actualisant sur la base du taux de préférence collective pour le présent (examiné plus loin). L'analyse a ensuite consisté à calculer le rapport bénéfice-coût de la limitation des émissions globales à 4 GtC par an et du maintien du réchauffement à long terme à environ 2.5°C. Lorsqu'on tenait compte d'un risque de dommages supérieurs, le résultat était que les avantages d'une telle stratégie dépassaient les coûts. Il importe de noter que cette conclusion a été tirée malgré l'absence de tout calcul d'effets catastrophiques dans le scénario de référence ou de variantes correspondant à des dommages plus élevés.

17. Rapport du GIEC de 1995 – Le deuxième rapport d'évaluation du GIEC comprenait un tour d'horizon des analyses coûts-bénéfices de la lutte contre le réchauffement planétaire (Pearce et al, 1996). Selon ce rapport, diverses études étaient parvenues à des estimations analogues des dommages enregistrés aux Etats-Unis pour un scénario de référence correspondant au doublement du CO<sub>2</sub> : 1 % du PIB pour Nordhaus (1991) et pour Cline (1992) ; 1.3 % pour Fankhauser (1995), et 1.5 % pour Tol (1995), même si

la composition des dommages estimés par catégorie variait très largement.<sup>11</sup> D'après des études portant les estimations au niveau mondial, les dommages étaient plus importants dans les pays non membres de l'OCDE (1.6 % du PIB pour Fankhauser et 2.7 % pour Tol). L'étude du GIEC (p. 215) mentionnait des estimations du "prix fictif du carbone," ou du coût social des dommages associés à une tonne supplémentaire d'émissions, qui pour les vingt premières années de ce siècle étaient de l'ordre de 7 à 27 USD pour Nordhaus (1994), 30 à 35 USD pour Ayres et Walter (1991), 12 à 18 USD pour Peck et Teisberg (1992), 25 USD environ pour Fankhauser, et 10 USD environ pour Maddison (1994). Une fourchette beaucoup plus large de 8 à 186 USD était indiquée dans les travaux de Cline (1997) en raison de l'éventail des taux d'actualisation qui y étaient appliqués.<sup>12</sup> Ces prix (tous en dollars de 1990) représentaient implicitement les montants qui pourraient justifier une taxe sur le carbone. Les auteurs du rapport du GIEC ont souligné que le choix du taux d'actualisation jouait un rôle déterminant dans l'estimation des prix fictifs.

18. *Nordhaus et Boyer (2000)* – Suite à une mise à jour importante du modèle DICE (et de sa version régionale, RICE) élaboré par William Nordhaus, ce dernier a entrepris, avec son co-auteur, de réduire l'échelle des trajectoires prévues par Nordhaus pour les émissions de carbone et le réchauffement, au motif que les études récentes suggéraient un niveau plus élevé de coûts d'extraction marginaux et par conséquent une influence auto-limitative sur les émissions de carbone.<sup>13</sup> Ils ont toutefois revu à la hausse les estimations des dommages pour un réchauffement supérieur à 2.5°C afin de tenir compte de la probabilité croissante d'effets catastrophiques. Ils ont étalonné ces effets en tenant compte des différentes opinions des spécialistes. Par exemple, ils ont estimé que pour les Etats-Unis, le consentement à payer pour éviter les dommages catastrophiques associés à un réchauffement 6°C représenterait 2.5 % du PIB, alors qu'il serait de 11 % du PIB en Europe et en Inde. Malgré une fonction de dommages plus fortement non-linéaire que celle précédemment utilisée, et compte tenu d'émissions de référence plus faibles, les auteurs parvenaient encore à une fourchette optimale de taxes sur le carbone à peu près semblable, commençant à 9 USD par tonne de carbone en 2005 pour atteindre 67 USD par tonne en 2105 (en dollars de 1990 ; p. 133.) Cette incitation à réduire les émissions, bien qu'optimale selon les hypothèses de Nordhaus-Boyer, représentait une atténuation extrêmement limitée des émissions et du réchauffement. Les réductions par rapport aux niveaux d'émission de référence ne seraient que de 5 % en 2005, pour passer progressivement à 11 % en 2105. Le réchauffement d'ici 2105 ne serait diminué que dans d'infimes proportions, passant de 2.53°C dans le scénario de référence à 2.44°C selon le scénario de réduction optimal. La raison principale de ce résultat optimal minime est l'utilisation d'un taux d'actualisation de 4 % au lieu du taux de 1-1/2 % que j'estime approprié pour l'analyse du réchauffement planétaire.<sup>14</sup> Avec le taux d'actualisation inférieur que j'utilise, le modèle DICE de Nordhaus-Boyer aboutit à des réductions d'émissions optimales par rapport au scénario de référence de l'ordre de 50 % pendant la majeure partie du XXIème siècle, et à une taxe sur le carbone de 240 USD par tonne en 2055 au lieu de 33 USD (Cline, 2004a).

19. *Jorgensen et al (2004)* – D'après la plupart des études récentes ne comportant aucune tentative de chiffrer les effets catastrophiques, les répercussions du changement climatique dans une phase initiale de

---

<sup>11</sup> Titus (1992) situait les dommages à un niveau plus élevé, de 2.5 % du PIB, mais à partir d'un scénario de référence prévoyant un réchauffement plus important, de 4°C.

<sup>12</sup> Mon étude de 1993, publiée dans Cline (1997), constituait une application du modèle DICE (Dynamic Integrated Climate and Economy) de Nordhaus faisant appel à divers taux d'actualisation.

<sup>13</sup> Nordhaus (1994) a estimé les émissions globales de carbone en 2100 à 25 GtC selon le scénario de référence, mais Nordhaus et Boyer (2000) ont ramené cette estimation à 13 GtC.

<sup>14</sup> Comme on le verra plus loin, la principale différence tient à l'élément de "préférence pure pour le présent" ou "d'impatience" du taux d'actualisation, que Nordhaus et Boyer fixent à 3 % et moi à zéro. Les deux études sont beaucoup plus proches en ce qui concerne le taux d'actualisation de la hausse du revenu par tête (1 % dans Nordhaus et Boyer, et 1-1/2 % dans mon analyse).

réchauffement modéré pourraient être soit positives, soit négatives. Jorgensen, Goettle, Hurd et Smith (JGH&S) étudient l'impact du changement climatique sur les Etats-Unis à l'horizon 2100, à partir de scénarios reposant sur une hypothèse basse, centrale ou haute de l'évolution du climat (réchauffement situé entre 1.7°C et 5.3°C d'ici 2100, augmentation des précipitations entre 2.1 et 6.6 %, et élévation du niveau de la mer entre 17.2 et 98.9 cm). En agriculture, ils s'appuient sur les estimations optimistes de l'USNCCA (2001) et sur les études pessimistes de Adams et al (1990) pour conclure que dans le scénario climatique "central" (2.4°C d'augmentation moyenne des températures d'ici 2100, 3.1°C aux Etats-Unis), l'impact moyen sur l'agriculture au cours du siècle se manifesterait par une baisse de productivité de 26 % dans les études pessimistes mais une augmentation de 20 % dans les études optimistes. La combinaison d'un fort réchauffement et d'une faible augmentation des précipitations est la plus défavorable. D'autres travaux de recherche concurrents aboutissent à des effets positifs ou négatifs pour la sylviculture, l'énergie (encore que pour l'électricité les estimations soient strictement négatives) et la mortalité. Les publications sur lesquelles s'appuient ces travaux indiquent des effets négatifs même dans les études optimistes pour la protection des zones côtières (les coûts étant cependant beaucoup plus faibles que dans les études pessimistes) et pour l'approvisionnement en eau (à l'exception d'un léger bénéfice dans le cas d'un faible réchauffement).

20. Dans la série des estimations optimistes, les travaux de JGH&S montrent que les bénéfices climatiques atteignent 1 % du PIB d'ici 2050 avant de retomber à 0.75 % du PIB en 2100 dans le scénario de réchauffement "haut", avec le même renversement de tendance en 2075 dans le scénario "central". Le point de renversement dans leurs scénarios optimistes correspond à un réchauffement global moyen de 1.9°C environ. C'est dans les secteurs de l'agriculture et de l'énergie que les effets initiaux sont bénéfiques dans le scénario optimiste, "mais uniquement tant que le changement climatique reste en deçà de niveaux critiques" (p. v). Dans la série d'estimations pessimistes, il n'y a pas de phase initiale favorable, et les dommages augmentent progressivement pour atteindre 0.9 % du PIB en 2050 et 1.9 % du PIB en 2100 dans l'hypothèse d'un fort réchauffement, ou 0.75 % et 1.1 % du PIB respectivement selon le scénario "central" de réchauffement. Si l'on retient l'hypothèse de faibles précipitations associées à un fort réchauffement dans le scénario pessimiste, les dommages atteignent 1.75 % du PIB en 2050 et 3 % du PIB en 2100. Les répercussions agricoles représentent à peu près les trois quarts des effets estimés dans les scénarios aussi bien optimistes que pessimistes. Les auteurs soulignent que même dans les scénarios optimistes, "les éventuels effets bénéfiques du changement climatique seront temporaires" (p. 39). Ils font également valoir que l'ampleur des effets sera probablement plus grande pour les autres pays où l'agriculture représente une part plus importante du PIB. Leur étude ne tient pas non plus compte des effets non marchands (par exemple, modification de la répartition des espèces, appauvrissement de la biodiversité, pertes de biens et services écosystémiques, modifications des habitats), qui ont "beaucoup plus de chances.... d'être négatifs que positifs" (p. viii).

21. L'idée force des travaux de JGH&S est à la fois de nous rappeler que certains effets initiaux du réchauffement planétaire pourraient être favorables pour les Etats-Unis et de souligner qu'ils pourraient aussi être défavorables, et qu'à terme, les conséquences deviendront négatives même sur la base des hypothèses optimistes.

22. *Cline (2004a)* – Dans l'étude que j'ai récemment réalisée dans le cadre du Consensus de Copenhague (Lomborg, 2004), j'ai adapté le modèle DICE de Nordhaus-Boyer (NB) afin de construire un modèle DICE-CL pour examiner la réduction optimale ainsi que le Protocole de Kyoto. J'ai utilisé leur fonction de coûts de réduction et leur fonction de dommages climatiques (qui applique un coefficient de pondération aux effets catastrophiques, comme on l'a vu plus haut). La fonction de dommages indique une phase initiale d'effets légèrement positifs.<sup>15</sup> Toutefois, j'ai ramené le niveau de référence des émissions à un

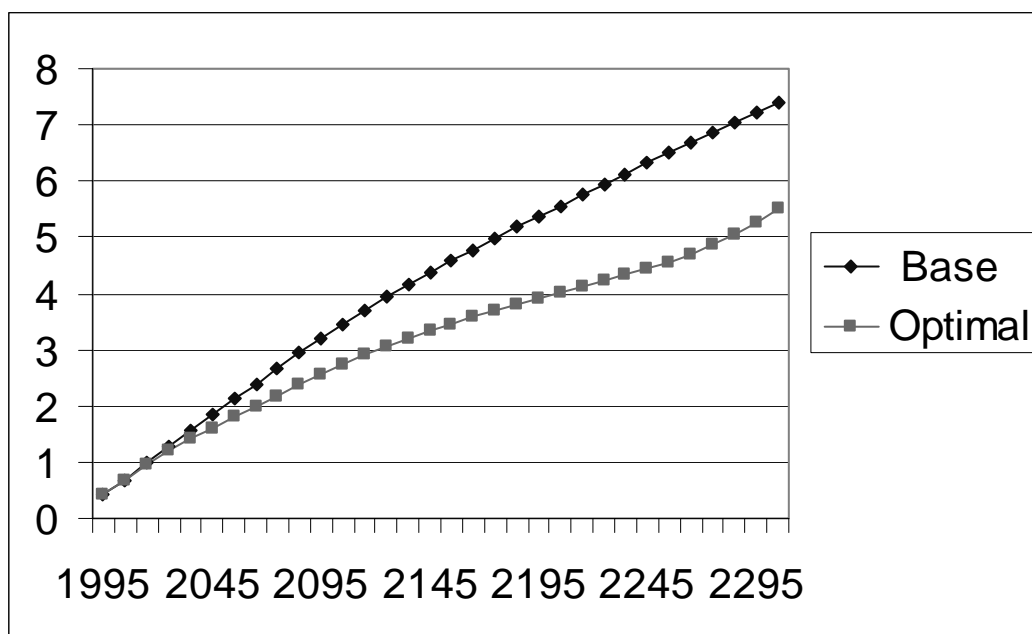
---

<sup>15</sup> La fonction de dommages de NB est la suivante :  $d_t = -0.0045 W_t + 0.0035 W_t^2$  où  $d_t$  désigne les dommages en pourcentage du produit mondial brut et  $W_t$  le réchauffement (degrés Celsius) par rapport à 1900. Le passage des bénéfices initiaux aux dommages se produit lorsque le réchauffement atteint 0.64°C, et que les bénéfices initiaux

niveau plus élevé, cohérent avec les scénarios plus plausibles du GIEC (2001a) et, par exemple, de Manne et Richels (2001), de sorte que dans le scénario "au fil de l'eau", les émissions de carbone passent de 8.6 GtC en 2005 à 21.4 GtC en 2100 et 38 GtC en 2200.<sup>16</sup>

23. La figure 1 montre l'ampleur du réchauffement planétaire dans le scénario de référence et sous l'effet de la politique de "réduction optimale" des émissions définie dans Cline (2004a). Dans le scénario "au fil de l'eau", le réchauffement planétaire atteint une estimation centrale de 3.3°C en 2100 et 7.3°C en 2300. Si la trajectoire de réduction est définie de manière à maximiser la valeur actualisée de la consommation sur la base du taux de préférence collective pour le présent (examiné plus loin), un moindre réchauffement permettant une consommation plus élevée mais une réduction plus forte exigeant le sacrifice de la consommation, la trajectoire optimale de réchauffement obtenue atteint un point moins élevé, de 2.6°C en 2100 et 5.4°C en 2300.

Figure 1. Trajectoire de base et trajectoire optimale du réchauffement (°C)



24. Les réductions optimales des émissions de carbone représentent entre 40 et 50 % du niveau de référence au cours du XXIème siècle, le maximum se situant à environ 65 % en 2200 (figure 2). Les taxes sur le carbone nécessaires pour opérer ces réductions, et de manière équivalente le prix environnemental fictif des dommages liés au réchauffement planétaire, commencent à environ 170 USD par tonne de carbone en 2005, pour atteindre quelque 250 USD en 2025, 600 USD en 2100, et culminer à 1 270 USD par tonne en 2200. On notera, à titre de comparaison, que 100 USD par tonne de carbone représenterait 0.30 USD par gallon d'essence, 13 USD par baril de pétrole, et 60 USD par tonne de charbon. Il se peut

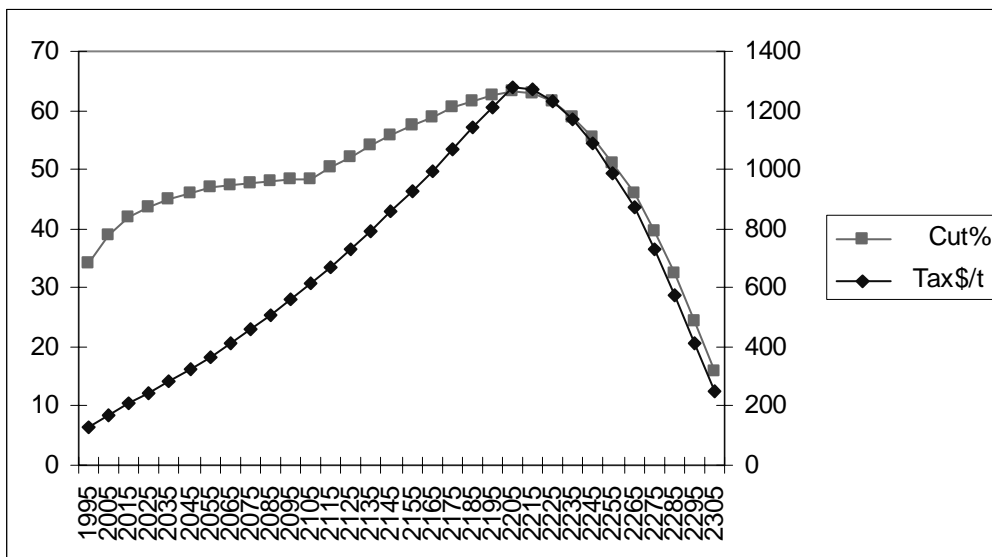
---

atteignent un maximum de 0.3 % du PMB. Les dommages sont nuls lorsque le réchauffement est de 1.29°C. Lorsque le réchauffement est de 2.9°C, pour un doublement du CO<sub>2</sub>, les dommages représentent 1.6 % du PMB, et à 6°C ils atteignent 9.9 % du PMB.

<sup>16</sup> J'ai aussi modifié les paramètres applicables au transit du carbone de l'atmosphère vers les océans afin d'être plus cohérent avec les taux de rétention atmosphérique utilisés par le GIEC (2001a). A propos de ces modifications et d'autres, voir Cline (2004a).

toutefois que les taxes sur le carbone soient surévaluées, la fonction de coût surestimant peut-être les coûts de réduction des émissions de carbone jusqu'en 2050 et au-delà.<sup>17</sup>

**Figure 2. Réduction optimale d'après DICE-CL (% restant) et taxes sur le carbone (en USD)**



25. La figure 3 représente les bénéfices résultant des dommages climatiques évités et les compare aux coûts de réduction des émissions. Sur un horizon lointain, les coûts interviennent plus tôt et les bénéfices résultant des dommages évités se font sentir plus tard. On voit donc pourquoi le taux d'actualisation est si important pour parvenir à la politique optimale, car il est nécessaire de comparer les coûts et bénéfices dans le temps. Dans l'hypothèse d'une politique optimale, on constate que la valeur actualisée des bénéfices (dommages évités) à l'échelle de 300 ans se chiffre à 271 000 milliards USD, et les coûts de réduction à 128 000 milliards USD, pour un rapport bénéfice / coût d'environ 2 pour 1.

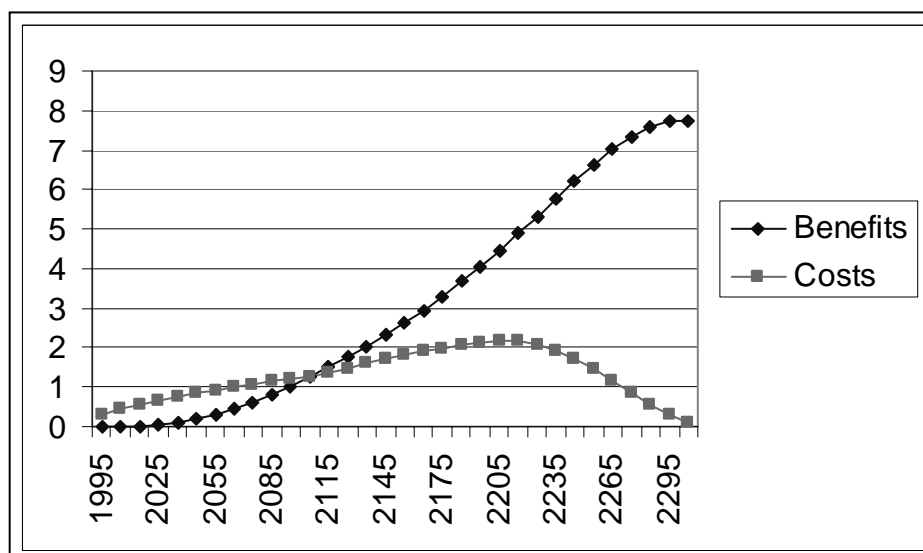
26. L'analyse de Cline (2004a) porte aussi sur les coûts et bénéfices résultant de la limitation des émissions industrielles des pays à leurs niveaux de 1990, en l'absence de restrictions sur les émissions des pays en développement (une version permanente du protocole de Kyoto). Si, globalement, les bénéfices excèdent les coûts, la réduction est nettement moins importante que dans la stratégie optimale, et pour les pays industriels les coûts des mesures de réduction sont supérieurs aux bénéfices. Enfin, l'analyse envisage une approche de la "valeur à risque", qui tient compte du réchauffement se situant dans le 95ème centile de la distribution des probabilités (d'après Andronova et Schlesinger, 2001). Dans ce cas, la réduction optimale est bien moins importante, et les dommages évités beaucoup plus grands.

27. Un important calcul supplémentaire effectué à l'aide du modèle DICE-CL (Cline, 2004a) a montré que grâce au programme offensif de réduction des émissions de carbone envisagé dans mon étude

<sup>17</sup> On ne trouve pas, dans la fonction de coût du modèle DICE, une technologie de rechange sans émissions de carbone assortie d'un coût maximal (fixé à 250 USD par tonne dans Cline, 1992). De plus, d'après la version mondiale du modèle DICE, il n'est pas prévu de diminution du coût marginal dans le temps sous l'effet de l'évolution technologique. (Cette question est examinée dans Cline, 2004a.) On notera en outre que d'après de récents travaux de recherche, la séquestration du carbone dans des formations souterraines naturelles, combinée à un recul de la production d'électricité à partir de charbon au profit de technologies de gazéification intégrée à cycle combiné, pourrait donner un début de réalité aux technologies de rechange n'émettant pas de carbone, au moins pour un tiers des émissions imputables à la production d'électricité. Voir Abraham (2003) et Johnson (2004).

antérieure (Cline, 1992) la limitation des émissions à 4 GtC par an aurait un rapport bénéfice-coût légèrement supérieur à l'unité (1.04). Cette évaluation est importante si l'on attribue un poids non négligeable à la notion de niveau de réchauffement "dangereux", et si l'on considère qu'à terme, un réchauffement de 5.3°C, même dans un scénario de réduction optimal, dépasse le niveau dangereux, car comme on l'a noté plus haut, geler les émissions à 4 GtC par an dans un avenir indéfini semblerait correspondre à une limitation du réchauffement à environ 2.5°C.

**Figure 3. Bénéfices et coûts d'une réduction optimale (% PMB)**



28. *Hitz et Smith (2004)* – Dans une étude destinée au projet de l'OCDE sur les avantages liés aux politiques climatiques, Sam Hitz et Joel Smith (H&S) ont récemment passé en revue les travaux consacrés à l'impact du changement climatique à l'échelle mondiale. Rejoignant dans une certaine mesure les conclusions de Jorgensen et al (2004), ils constatent dans certains secteurs une évolution "parabolique", l'élévation de la température moyenne globale (TMG) s'accompagnant initialement d'effets bénéfiques, avant de provoquer des dommages au-delà d'un certain seuil de réchauffement, alors que dans d'autres secteurs les dommages ne font qu'augmenter. Les ressources côtières, la biodiversité et, peut-être, la productivité des écosystèmes marins font partie des domaines dans lesquels l'augmentation de la TMG aurait des répercussions défavorables croissantes. En revanche, pour l'agriculture, la productivité des écosystèmes terrestres et éventuellement la sylviculture, l'augmentation de la TMG commence par avoir des effets bénéfiques mais entraîne des dommages au-delà d'un certain seuil. Les effets sur l'eau, la santé et l'énergie sont incertains, de même que les effets cumulés. Toutefois, les auteurs ont constaté que "dans toutes les études examinées, à l'exception possible de celle sur la sylviculture, au-delà d'une hausse de la TMG d'environ 3 à 4°C, les répercussions sont de plus en plus défavorables" (p. 31). Ils ajoutent toutefois que de nombreuses études n'abordent pas les conséquences au-delà du XXIème siècle, et que "pour des systèmes caractérisés par des phénomènes d'inertie à long terme, comme le système climat-océan, les conséquences ... sont peut-être sous-estimées" (p. 65). Compte tenu des craintes liées à la fonte de la nappe glaciaire du Groenland mentionnées au début du présent document, il semblerait donc particulièrement critiquable de conclure qu'un réchauffement ne dépassant pas 3-4°C puisse être bénéfique.

29. En ce qui concerne la montée du niveau de la mer, les auteurs citent les calculs de Fankhauser (1995), d'après lesquels la protection des zones côtières coûterait 10 milliards USD par centimètre d'élévation du niveau de la mer d'ici 2100. Pour une élévation de 1 mètre, ce coût total de 1 000 milliards USD est obtenu en appliquant un taux d'actualisation de zéro. Concernant l'agriculture,

H&S estiment qu'en deçà d'un réchauffement de 3°C-4°C, les effets sont incertains, mais soulignent qu'au dessus de 3°C, l'ensemble des travaux publiés laisse prévoir une baisse des rendements des cultures : les cultures céréalières voient leur rendement diminuer à partir de certains seuils de température, les effets fertilisants du dioxyde de carbone parviennent à la longue à saturation, et “à terme ... les redistributions géographiques ne peuvent compenser la hausse des températures” (p. 44). Ils notent que pour Parry et al (1999), les dommages se font sentir même à 1°C d'augmentation de la TMG, et que d'après Rosenzweig et al (1995), les dommages résultant d'une augmentation de plus de 4°C s'accroissent très rapidement (même avec des mesures d'adaptation) alors qu'une hausse de 2.3°C produit des effets bénéfiques. Ils sont d'avis que les répercussions du changement climatique sont relativement faibles par rapport aux augmentations de la production agricole correspondant au scénario de référence (réductions de la production de 20 à 90 millions de tonnes d'ici 2080 contre un accroissement de la production totale de 4 000 mt selon le scénario de référence). Ils soulignent que les pays en développement pourraient subir des conséquences plus fâcheuses, car “les périodes de végétation sont plus longues et plus chaudes aux latitudes élevées, où se situent de nombreux pays développés, et elles sont plus courtes et plus sèches sous les tropiques, où se trouvent la plupart des pays en développement” (p. 43).

30. Bien que, d'après H&S, les diverses études consacrées au stress hydrique ne permettent pas de tirer des conclusions formelles, elles démontrent que les risques sanitaires sont davantage susceptibles d'augmenter que de diminuer avec la hausse de la TMG. Ces études font cependant état d'importantes différences régionales, la Méditerranée, le Moyen Orient et certaines régions d'Afrique et d'Amérique du Sud étant appelées à subir les effets d'un stress hydrique. Les estimations effectuées à l'aide de modèles varient en partie à cause de l'incohérence des données concernant l'évolution estimée des précipitations régionales. Pour la santé, H&S laissent également entendre que les profils d'évolution ne sont pas concluants. La plupart des études laissent prévoir une augmentation des risques sanitaires parallèlement à la hausse des températures, et notamment une relation linéaire entre les températures et les zones de transmission potentielle du paludisme. Toutefois, certains auteurs font valoir que la mortalité devrait diminuer dans le temps en raison de l'amélioration de la santé publique, et que le paludisme en particulier devrait disparaître sous l'effet de la croissance économique – une hypothèse peut-être trop optimiste. Quant à la mortalité associée à la chaleur et au froid, les auteurs citent Tol (2002), pour lequel, à l'échelle mondiale, les décès imputables à des conditions climatiques extrêmes devraient commencer par diminuer, avant de reprendre leur progression après 2050. Toutefois, cette étude est antérieure à la vague de chaleur mortelle qui a frappé l'Europe en 2003 (et que l'on examinera plus loin).

31. S'agissant de la consommation d'énergie, H&S sont “tout à fait convaincus que la consommation mondiale d'énergie finira par augmenter avec la hausse de la température moyenne globale” car l'accroissement des dépenses de climatisation excèdera à terme les économies réalisées sur le chauffage, mais ils ne sont pas certains de l'existence d'une phase initiale pendant laquelle les économies l'emporteront. Au sujet des écosystèmes terrestres, H&S recensent des études indiquant une croissance initiale de la capacité des puits de carbone terrestres, suivie par un renversement de tendance lorsque les températures auront augmenté au point d'entraîner le déclin ou la disparition de forêts tropicales ou tempérées. La hausse des concentrations de dioxyde de carbone favorise initialement la croissance des végétaux, mais il se produit une saturation (à des concentrations de l'ordre de 600 à 800 ppm pour les plantes C<sub>3</sub>, comme le blé, le riz et le soja). L'élévation des températures entraîne une augmentation exponentielle de l'évapotranspiration. Au sujet de l'aptitude des écosystèmes à changer d'aire géographique, une étude citée par les auteurs fait valoir que si la température augmente de 3°C au cours du XXI<sup>ème</sup> siècle, 30 % seulement des écosystèmes pourraient être en mesure de s'adapter. En ce qui concerne les forêts, H&S prévoient un profil d'évolution analogue, l'amélioration initiale de la situation étant suivie d'un renversement de tendance, et notent l'absence d'études corrélant les résultats à la température. S'agissant de la biodiversité, ils citent des estimations selon lesquelles, dans l'hypothèse d'une augmentation de 3°C de la TMG, “la moitié de toutes les réserves naturelles seront incapables de maintenir leurs objectifs de conservation originaux ” (p. 59). Dans les pêcheries, H&S rapportent les résultats d'une étude prévoyant

une baisse globale de 6 % de la “production d'exportation” (définie de façon ambiguë), avec en particulier un déclin de 20 % aux basses latitudes et notamment dans les importantes pêcheries du Pacifique équatorial, essentiellement sous l'effet de l'appauvrissement en éléments nutritifs, déclin compensé en partie par une hausse de 30 % aux latitudes élevées, principalement due à l'amélioration de l'efficacité lumineuse.

32. *Tol, Downing, Kuik et Smith (2004)* – Dans une étude destinée au projet de l'OCDE sur les avantages liés aux politiques climatiques, Richard Tol, Thomas Downing, Onno Kuik, et Joel Smith examinent les disparités régionales des effets du réchauffement de la planète. Ils concluent que “le changement climatique affectera probablement plus durement les populations les plus démunies de la planète, car elles sont plus exposées aux aléas climatiques, plus proches des limites biophysiques du climat, et ont une moindre capacité d'adaptation” (p. 259). Ils recensent les estimations régionales existantes, et notent que Nordhaus et Boyer (2000) ont tendance à prévoir des dommages plus importants que d'autres auteurs, essentiellement parce qu'ils tentent de prendre en compte les risques d'effets catastrophiques. Ils constatent que Downing et al (1996) mettent l'accent sur la marge d'incertitude considérable qui entoure les estimations des dommages, lesquelles varient entre un impact quasiment nul et près de 40 % du produit mondial. A l'opposé, ils signalent que d'après Tol (2002), un réchauffement planétaire limité à 1°C produirait des effets remarquablement bénéfiques aux Etats-Unis (gain de 3.4 % du PIB) et en Europe (+3.7 %), mais entraînerait de fortes pertes en Afrique (-4.1 %) et en Asie du Sud et du Sud-Est (-1.7 %), même à ce faible niveau. Il ressort des estimations de Tol que les effets à l'échelle mondiale d'un réchauffement initialement modéré sont positifs s'ils sont pondérés en fonction de la production (+2.3 %) mais négatifs s'ils le sont en fonction de la population (-2.7 %).<sup>18</sup> Les auteurs notent également que les estimations actualisées des effets climatiques peuvent minimiser les dommages car elles tendent à faire abstraction des phénomènes météorologiques extrêmes ainsi que de l'effet d'amplification des facteurs de stress multiples.

33. Les auteurs montrent comment l'application de coefficients de pondération “au titre de l'équité” influe sur l'estimation des dommages. Alors que les dommages globaux “non corrigés” résultant d'un doublement du dioxyde de carbone sont estimés à 322 milliards USD par Fankhauser et à 364 milliards USD par Tol (dans l'hypothèse d'un réchauffement plus important que son hypothèse de 1°C), dans la variante qui donne le plus grand poids à l'équité (fonction de bien-être utilitaire avec un coefficient d'aversion pour le risque de 1.5) le total de ces dommages passe à 622 milliards USD et 1 060 milliards USD par an, respectivement.

34. *CBO (2005)* – Dans son évaluation la plus récente de la politique à l'égard du changement climatique, le Congressional Budget Office des Etats-Unis (CBO, 2005) met l'accent sur la difficulté que représente la formulation d'une stratégie d'intervention dans un contexte d'incertitudes économiques et scientifiques considérables. Il prend note des récentes craintes exprimées au sujet d'éventuels changements abrupts. Il note que nombre des dommages relèveraient de catégories non marchandes, comme les dommages aux écosystèmes, ce qui rend difficile de mesurer le consentement à payer pour les éviter. Le CBO note que différentes méthodes d'actualisation sont utilisées, depuis l'application du taux de rendement des investissements à long terme, jusqu'à celle de taux plus faibles car le taux de rendement des investissements excède le taux de préférence pour le présent du fait de l'écart introduit par la fiscalité, et à des taux plus faibles encore basés sur l'équité entre générations. Les auteurs observent aussi que plus l'aversion pour le risque est grande, plus on préférera des mesures de réduction plus rigoureuses.

35. Les chercheurs du CBO examinent les répercussions d'effets régionaux disparates, citant comme exemple l'estimation selon laquelle une hausse de 2.5°C de la température mondiale pourrait se traduire en

---

<sup>18</sup> Ces estimations reposent sur des hypothèses optimistes quant à la capacité d'adaptation et les grandes tendances en matière de développement.

Inde par une perte de production de 5 % alors que la Russie pourrait gagner 0.65 % de PIB. En particulier, ils font valoir que “les Etats-Unis supporteraient une partie substantielle des coûts [de la réduction globale des émissions] mais bénéficieraient d'une part beaucoup plus faible des avantages. Les pays en développement, en revanche, supporteraient une partie relativement faible des coûts mais recevraient une part disproportionnée des avantages.” Ce raisonnement provocateur semble ne guère accorder de valeur aux gains que la limitation du réchauffement planétaire représentera à terme pour les propres descendants des citoyens des Etats-Unis, et qui seraient sans aucun doute remis en question en cas de réchauffement nettement supérieur à 2-3°C ; de plus, il est préférable d'apprécier la “part” des coûts de réduction en les rapportant au PIB (auquel cas ces coûts pourraient être considérables pour les pays en développement qui s'associeront à l'effort de réduction) afin d'obtenir un partage équitable du fardeau.

36. Compte tenu des incertitudes, les auteurs du rapport du CBO soulignent l'importance d'adopter un moyen d'action qui ait “le plus de chances de minimiser le coût représenté par le choix du 'mauvais' niveau de réduction”, et considèrent par conséquent que les “instruments axés sur les prix sont beaucoup plus efficaces que les instruments quantitatifs” pour restreindre les émissions de carbone. Ils admettent que d'après les travaux de recherche actuels, la prise en compte des effets catastrophiques peut faire pencher la balance en faveur des restrictions quantitatives, mais notent que les conditions d'un tel basculement ne sont pas encore réunies. Il faut en particulier : connaître le seuil, prévoir l'intensification rapide des dommages au-delà de ce seuil, et savoir que les émissions actuelles rapprochent le climat de ce seuil. Les auteurs sont conscients de la difficulté de définir le prix juste dans une politique de réduction axée sur les prix, mais sont d'avis qu'il est possible de modérer les coûts d'une politique de tarification en augmentant progressivement les prix. Ils soulignent également l'importance des mesures d'adaptation dans une stratégie d'action appropriée.

### *Non-linéarités*

37. On sait depuis longtemps que des effets catastrophiques non linéaires pourraient être la source la plus importante de dommages liés au réchauffement planétaire. La méthode de Cline (1992) a consisté à examiner la question sans tenir directement compte de ces effets, et le rapport bénéfices-coûts d'une action dynamique (moyennant une certaine pondération en fonction des risques) ayant été jugé favorable, les effets catastrophiques ont simplement été considérés comme des éléments qualitatifs renforçant les conclusions pour l'action. Nordhaus et Boyer (2000) se sont au contraire efforcés d'intégrer dans la fonction de dommages de l'analyse une évaluation monétaire du consentement à payer pour éviter des effets catastrophiques. Cette section expose succinctement les évolutions récentes qui paraissent importantes dans ce domaine.

38. *Distribution asymétrique des probabilités de réchauffement* – Les travaux scientifiques récemment publiés mettent généralement l'accent sur le traitement probabiliste du paramètre de sensibilité climatique – le réchauffement attendu dans le scénario de référence (le plus souvent un doublement, par rapport aux niveaux préindustriels, des concentrations atmosphériques d'équivalent dioxyde de carbone). Andronova et Schlesinger (2001) utilisent 16 modèles de forçage radiatif pour retracer l'évolution des températures au cours des 140 dernières années. Après avoir tenu compte des gaz à effet de serre, de l'ozone troposphérique, des aérosols sulfatés, du forçage solaire et des effets volcaniques, ils examinent la densité de probabilité du paramètre de sensibilité climatique (CS) découlant implicitement de l'évolution des températures. La valeur centrale longtemps utilisée pour la sensibilité climatique, CS = 2.5°C de réchauffement pour un doublement du CO<sub>2</sub>, remonte au premier rapport du GIEC (IPCC, 1990) et a été très récemment confirmée dans le troisième Rapport d'évaluation (IPCC, 2001). La fourchette de 1.5°C à 4.5°C calculée par le GIEC pour les valeurs possibles de ce paramètre est aussi demeurée inchangée. Cependant, Andronova et Schlesinger sont parvenus à la conclusion qu'il existe “70 % de chances que la sensibilité climatique dépasse la valeur maximale fixée par le GIEC à 4.5°C” (p. 4). De fait, pour ces auteurs, 9.3°C est la valeur de la sensibilité climatique nécessaire pour obtenir une probabilité de 95 % que le

réchauffement ne soit pas plus élevé. Plusieurs autres études ont abouti à des résultats analogues, avec une longue "queue" de la fonction de distribution des probabilités pour les valeurs élevées du paramètre de sensibilité climatique (voir Hare et Meinshausen, p. 12).

39. Cline (2004a) recourt à la méthode de la "valeur à risque" utilisée dans le secteur financier pour justifier la prise en compte de la réduction optimale calculée pour  $CS=9.3^{\circ}C$ . Les institutions financières déterminent les besoins en capital en considérant la perte la plus importante qu'elles pourraient subir sur une période de temps donnée, jusqu'à un niveau précis de probabilité (99 % par exemple). Par analogie, on aurait intérêt à mettre en place des politiques visant à limiter le niveau maximal des dommages résultant du changement climatique jusqu'à une limite de probabilité donnée. Si l'on calcule les dommages pour une sensibilité climatique de  $9.3^{\circ}C$ , correspondant d'après Andronova et Schlesinger à 95 % de certitude que le réchauffement ne sera pas plus fort, on parvient à un niveau optimal de réduction des émissions et de taxation du carbone bien plus élevé. De fait, la réduction correspond au maximum acceptable dans le modèle (90 % par rapport au scénario de référence), et la taxe sur le carbone commence à 450 US par tonne pour atteindre 1 900 USD par tonne en 2200. L'idée fondamentale est simplement que la plupart des analyses coûts-bénéfices réalisées jusqu'à présent ont pris en compte des valeurs centrales au lieu de suivre une méthode fondée sur la valeur à risque et mettant l'accent sur les niveaux de réchauffement dont on peut affirmer avec un degré de confiance élevé qu'ils ne seront pas dépassés.

40. *Circulation thermohaline* – Schneider et Thompson (2000) font valoir que la plupart des analyses économiques du réchauffement global, et en particulier le modèle DICE largement utilisé, sous-estiment peut-être les dommages potentiels en partant de scénarios d'évolution progressive du climat.<sup>19</sup> Ils développent un modèle climatique (Simple Climate Demonstrator - SCD) qui intègre les répercussions de l'arrêt du "tapis roulant océanique". Ce phénomène (la circulation thermohaline, CT) est le mécanisme selon lequel les eaux froides plongent dans l'Atlantique Nord, sont transportées vers le sud par un courant océanique profond, refont surface dans les régions de basse latitude, puis remontent vers le nord grâce aux courants océaniques superficiels (comme le Gulf Stream). Ainsi, les températures hivernales en Europe occidentale sont supérieures de  $15^{\circ}C$  à ce qu'elles seraient en l'absence de ce phénomène. Les données paléoclimatiques font apparaître de nombreux cas de ralentissement ou d'arrêt de la circulation thermohaline, qui auraient été déclenchés par la fonte de calottes glaciaires et la libération d'eau douce. Moins dense que l'eau de mer, l'eau douce forme une couche à la surface de l'Atlantique qui empêche l'eau de descendre au fond. Le réchauffement de l'eau lui-même réduit aussi sa densité et son potentiel de déplacement vertical. Il existe des mécanismes de rétroaction positive et négative, et le rythme auquel le système est entraîné par le réchauffement global peut déterminer lequel de ces mécanismes prédominera et s'il se produira un arrêt de la circulation thermohaline.<sup>20</sup>

41. Dans leur modèle SCD, l'océan est décrit comme ayant deux états, avec ou sans renversement des eaux. La diminution de la densité de l'eau dans l'Atlantique Nord peut déclencher le basculement d'un de ces états à l'autre, correspondant à une augmentation soit de la température soit de la quantité d'eau douce. Les auteurs appliquent le modèle en utilisant un paramètre de sensibilité climatique de  $CS=3.0^{\circ}C$ . Avec une faible stabilisation du carbone atmosphérique (450 ppm), le phénomène de renversement perd un tiers environ de sa force ; lorsque la concentration est la plus forte considérée (1 350 ppm), le phénomène de renversement s'arrête entièrement. Dans ce dernier cas, la "boîte" océanique nord du modèle se stabilise à une température inférieure de  $8^{\circ}C$  à la valeur actuelle, même si la température moyenne globale est plus

---

<sup>19</sup> Voir aussi Schneider et Lane (2004).

<sup>20</sup> Le fait que le différentiel de température entre le Nord et le Sud diminue avec le réchauffement global produit un effet de rétroaction négative stabilisant, et ce différentiel constitue le moteur du Gulf Stream ; si l'influence du Gulf Stream sur la température était moins grande, les températures locales ne seraient pas aussi élevées qu'en l'absence de cet effet de rétroaction. Une rétroaction positive déstabilisante imputable à la même décélération du Gulf Stream découlerait du fait qu'un apport réduit d'eau salée subtropicale dans l'Atlantique Nord abaisserait la salinité et le potentiel de déplacement vertical de l'eau.

élevée de 3.6°C. De même, la circulation thermohaline s'arrête si la concentration atmosphérique est seulement de 750 ppm mais si le paramètre de sensibilité climatique est de 4.5°C. La circulation dépend du rythme de progression des concentrations de CO<sub>2</sub> ainsi que du niveau ultime de stabilisation. Si la concentration atmosphérique augmente de 1 % par an, le phénomène est ralenti dès 750 ppm même dans l'hypothèse centrale CS=3.0°C. Les auteurs font valoir que ce mécanisme de stabilisation "pourrait avoir une incidence marquée sur le débat concernant le moment d'intervention (voir par exemple Wigley, Richels et Edmonds, 1996), certains faisant valoir que le report des mesures de réduction est préférable car une action précoce serait trop coûteuse" (p. 74).

42. *Vagues de chaleur* – Le Centre Hadley (2004) a récemment examiné trois cas d'événements climatiques violents. Outre le ralentissement de la circulation thermohaline et la déglaciation du Groenland,<sup>21</sup> le Centre Hadley a examiné la vague de chaleur qui a frappé l'Europe en 2003. Cette année-là, l'Europe a connu son été le plus chaud depuis le début des enregistrements météorologiques en 1860, et probablement depuis cinq siècles. Outre les incendies de forêts et les pertes agricoles, on estime que 15 000 décès surnuméraires ont été enregistrés. Le Centre a examiné dans quelle mesure le changement climatique d'origine anthropique a modifié le risque d'apparition d'un tel phénomène extrême. Abstraction faite de ce changement, les estimations obtenues à l'aide du modèle montrent que des épisodes de chaleur extrême sont susceptibles de se produire une fois tous les 1 000 ans seulement. En tenant compte des évolutions imputables aux activités humaines, le modèle porte cette fréquence à une fois tous les 250 ans. Le Centre estime que le risque associé à la vague de chaleur européenne de 2003 était lié pour moitié au moins aux activités humaines. Il prévoit également que compte tenu des émissions de référence, d'ici les années 2040, plus de la moitié des étés européens seront probablement aussi chauds que celui de 2003.

### **Actualisation de l'avenir**

43. Le taux d'actualisation choisi pour comparer les coûts et les bénéfices d'une réduction des émissions de carbone est peut-être l'élément essentiel des analyses économiques. La figure 3 montre pourquoi le taux d'actualisation est si important. Les coûts interviennent tôt et continuent alors que les bénéfices résultant des dommages évités s'obtiennent plus tard et grossissent considérablement à une échéance très lointaine. Il existe des désaccords majeurs entre les économistes quant à la méthode d'actualisation appropriée à utiliser dans les études sur le changement climatique en raison des échelles de temps extrêmement longues en jeu (voir en particulier Arrow et al., 1996, et Portney et Weynant, 1999).

44. Selon Cline (1992), la bonne méthode d'actualisation pour les études sur le changement climatique consiste à suivre le principe de l'analyse coûts sociaux-bénéfices (Arrow, 1966 ; Feldstein, 1970 ; Bradford, 1975). Cette méthode d'analyse postule qu'en raison des distorsions dues à la fiscalité et à d'autres facteurs, le taux constaté de retour sur investissement est plus élevé que le taux d'actualisation utilisé par les ménages pour comparer la consommation dans le temps. Il existe un "prix fictif du capital" signifiant qu'une unité de capital vaut plus cher qu'une unité de consommation. Ainsi, la bonne méthode consiste à appliquer ce prix fictif à tous les effets liés au capital, puis à actualiser tous les effets "équivalent consommation" sur la base du "taux de préférence collective pour le présent" (TPCP). Ce taux comprend deux éléments (équation 1). Le premier élément est l'impatience pure : c'est le taux auquel un ménage peut actualiser sa consommation future, même s'il sait qu'il ne sera pas plus riche dans l'avenir. Cet élément est appelé "préférence pure". Le deuxième élément est le taux d'actualisation que le ménage applique parce qu'il escompte qu'il va être plus riche dans l'avenir et que l'utilité marginale de sa consommation supplémentaire sera plus faible qu'aujourd'hui.

---

<sup>21</sup> Dans une simulation effectuée à l'aide du modèle climatique du Centre Hadley et tablant sur une stabilisation du CO<sub>2</sub> à 1 100 ppm, la nappe glaciaire du Groenland fond presque entièrement en l'espace de 3 000 ans, et le niveau de la mer monte de 7 mètres. Au cours du premier millier d'années, plus de la moitié de la nappe glaciaire disparaît, contribuant à une élévation de 4 mètres du niveau de la mer.

$$(1) \text{TPCP} = \rho + \theta g_y$$

45. Dans l'équation (1), le premier terme, la préférence pure pour le présent, est exprimée par le taux " $\rho$ ". Le deuxième terme, celui de droite, exprime la baisse future de l'utilité marginale due à l'augmentation du niveau de vie. Il est égal au taux de croissance du revenu par tête  $g_y$  multiplié par "l'élasticité de l'utilité marginale"  $\theta$  (valeur absolue). Cette élasticité exprime le pourcentage de réduction de l'utilité marginale d'un dollar de consommation supplémentaire pour chaque pourcent d'augmentation du revenu par tête. La fonction d'utilité logarithmique, la plus couramment utilisée, a une élasticité d'utilité marginale égale à l'unité. Cline (1992) applique une élasticité de 1.5, donc un peu supérieure, pour avoir un taux d'actualisation, reposant sur l'augmentation du revenu par tête, un peu plus élevé que ce que donnerait une fonction d'utilité logarithmique.

46. La pierre d'achoppement dans la procédure d'actualisation appliquée à l'analyse du changement climatique a porté sur la valeur à attribuer au taux "d'impatience" de la préférence pure pour le présent,  $\rho$ . Cline (1992) suit Ramsey (1928), le père de la théorie de la croissance optimale, en prenant une préférence pure pour le présent égale à zéro. Il justifie ce choix au motif qu'une préférence pure positive pour le présent pénalise les générations futures parce que, toutes choses étant égales par ailleurs (c'est-à-dire après avoir appliqué le deuxième élément du taux d'actualisation pour tenir compte de l'augmentation du revenu par tête), elles devraient accepter des niveaux de vie plus bas que ceux d'aujourd'hui. Ramsay estimait "moralement indéfendable" d'appliquer une valeur positive à la préférence pure pour le présent.<sup>22</sup> Même dans une même génération ou un même ménage, une préférence pure positive pour le présent implique que les individus sont prêts à vivre leurs vieux jours dans la pauvreté pour pouvoir vivre dans le luxe aujourd'hui, ce qui n'est pas logique ni cohérent avec le comportement des ménages (nonobstant le niveau peu élevé du taux d'épargne actuel des ménages aux Etats-Unis, qui traduit plutôt l'espoir d'accroître sa richesse, dans le secteur immobilier en particulier). A l'opposé, Nordhaus et Boyer (2000) ont fixé le taux de la préférence pure pour le présent à 3 % (tout en prévoyant un léger recul à un horizon d'un siècle). Ils ont choisi ce taux parce qu'ils pensent qu'il traduit les comportements réels mais, comme on l'a succinctement évoqué précédemment, des éléments concrets sur les comportements actuels permettent de prétendre le contraire. Toutefois, pour revenir à des points plus fondamentaux, lorsqu'il s'agit de prendre des décisions qui influenceront sur les deux ou trois prochains siècles, il faudrait s'en remettre à des principes fondamentaux (comme la réflexion de Ramsey au sujet de ce qui est "moral") plutôt qu'à des observations récentes des taux du marché pour décider des politiques. Les marchés ne vont pas au-delà de 30 ans, ce qui signifie que les taux observés sur les marchés ne sont pas pertinents à l'aune des périodes en jeu.

47. Etant donné que la croissance globale du revenu par tête est fixée à 1 % par an sur le très long terme, le taux d'actualisation utilisé dans l'équation (1) de Cline (1992) est de 1.5 % ( $\text{TPCP} = 0 + 1.5 \times 1$ ). Pour passer à l'équivalent consommation, on convertit les effets liés au capital en unités de consommation sur la base d'un prix fictif d'environ 1.6 à 1. A l'opposé, Nordhaus et Boyer appliquent un taux d'actualisation de 4 % (3 % pour la préférence pure pour le présent et 1 % lorsque la fonction d'utilité logarithmique qu'ils utilisent repose sur une croissance par tête de 1 % par an). La différence est énorme. Ainsi, des dommages évalués à 1 milliard USD dans 200 ans correspondent à 51 millions USD d'aujourd'hui avec un taux d'actualisation de 1.5 % alors qu'ils ne correspondent plus qu'à 392 000 USD avec un taux d'actualisation de 4 %. Vu dans l'autre sens, avec un taux d'actualisation de 1.5 %, la juste compensation pour une personne qui renonce à 1 dollar aujourd'hui est que son descendant bénéficie de 20 USD de plus. Avec un taux d'actualisation de 4 %, il faudrait que le descendant bénéficie de 2 550 USD de plus pour compenser le renoncement à 1 dollar d'aujourd'hui. La comptabilisation des effets futurs à leur valeur d'aujourd'hui pour pouvoir comparer ces effets quelle que soit l'échelle de temps considérée est

---

<sup>22</sup> Mishan (1975) prétend pareillement que cette valeur doit être prise égale à zéro pour les comparaisons entre générations parce que la génération future ne peut pas participer à la décision.

au cœur du débat politique sur la question de savoir si le réchauffement climatique est un problème ou non. Le problème disparaît complètement si l'économiste ou le responsable politique est prêt à appliquer des taux d'actualisation de 5 ou 10 %.

48. Dans la deuxième étude du GIEC, une équipe d'économistes utilisait les termes "prescriptive" et "descriptive" pour différencier la méthode TPCP et les méthodes utilisant les taux observés sur les marchés. Cette dichotomie ne rend probablement pas justice à la méthode TPCP parce que si l'on recherche la preuve empirique du niveau du taux de préférence pure pour le présent, on constatera que ce taux est très bas. Le meilleur indicateur de ce taux est le retour réel sur les bons du Trésor qui ne présentent ni risque de crédit, ni risque lié à l'évolution des taux d'intérêt (parce qu'il s'agit de titres à court terme). Ce taux réel n'est que de 1 % environ depuis plusieurs décennies. En prenant un taux de préférence pure pour le présent égal à zéro, on est donc plus près des chiffres réels qu'en le fixant à 3 %.

49. Weitzman (1998) considère qu'il convient "d'actualiser l'avenir lointain au taux le plus bas possible". Il arrive à cette conclusion en soulignant les incertitudes qui entourent les taux d'intérêt eux-mêmes. Lorsque la valeur actualisée d'événements futurs est obtenue à partir d'un taux d'actualisation instantané quasi certain, c'est le taux le plus bas qui prédomine.<sup>23</sup> L'argumentation consiste essentiellement à dire que la valeur actualisée "escomptée" (probabilité pondérée) est beaucoup plus proche de la valeur actualisée obtenue avec le plus faible des taux d'actualisation possibles plutôt qu'avec le plus fort et qu'en moyennant les deux taux, on sous-estime grandement la valeur actualisée escomptée.<sup>24</sup>

50. Newell et Pizer (2001) adoptent ce cadre d'incertitude sur les taux d'actualisation pour analyser l'impact de l'actualisation dans l'analyse du changement climatique. Ils présentent des données qui montrent que les taux d'intérêt réels des obligations d'Etat américaines à long terme sont passés d'une fourchette de 4-7 % au XIXème siècle à une fourchette de 2-4 % dans la majeure partie du XXème siècle, abstraction faite d'un bref épisode à 6 % au début des années 80. Ils ont mené des expériences qui montrent que lorsque les taux d'intérêt futurs sont dictés par une "évolution aléatoire" de différents changements, les bénéfices d'une réduction des émissions de carbone d'une tonne peuvent aller jusqu'à doubler (passant d'environ 5 à 10 USD si le taux de base est de 4 % et de 20 à 30 USD s'il est de 2 %). Ils soulignent cependant que l'intégration de l'incertitude accroît généralement la valeur actualisée de la réduction de ces émissions dans une proportion moindre que l'adoption de taux d'intérêt plus bas.

### **Calcul du coût de report**

51. On peut se fonder sur l'analyse de Cline (2004a) pour calculer approximativement le coût d'un report des mesures de réduction des émissions de carbone. Le modèle DICE-CL adapté donne le prix environnemental fictif du carbone pour chaque période. Ce prix correspond essentiellement à la valeur des dommages résultant d'une tonne supplémentaire d'émissions d'équivalent carbone. La solution optimale de ce modèle permet aussi d'estimer le coût des mesures de réduction prises au cours de chaque période. Nous pouvons utiliser le prix fictif du carbone pour estimer le bénéfice de chaque tonne évitée et le

---

<sup>23</sup> "Dans une perspective actuelle, le seul scénario limitatif pertinent est celui qui retient le taux d'intérêt le plus bas ; toutes les autres situations à une échelle aussi lointaine sont, par comparaison, bien moins importantes aujourd'hui parce que leur valeur actualisée a été réduite par le phénomène amplificateur d'actualisation à un taux plus élevé." (p. 205)

<sup>24</sup> Supposons une probabilité de 50 % que le taux d'actualisation soit de 4 % pendant les 100 prochaines années et une même probabilité de 50 % qu'il soit de 1.5 %. Si l'on retient le taux de 4 %, la valeur actualisée d'un dommage de 1 milliard USD survenant dans 100 ans est de 19.8 millions USD. Avec un taux de 1.5 %, la valeur actualisée est de 225.6 millions USD. La valeur actualisée escomptée est de  $0.5 \times 19.8$  millions USD +  $0.5 \times 225.6$  millions USD = 122.7 millions USD. Si l'on calcule l'actualisation à partir de la moyenne des deux taux, soit 2.75 %, on obtient une valeur actualisée de 66.3 millions USD seulement.

comparer au coût des mesures de réduction. L'absence de mesures de réduction pendant une période donnée se traduira donc par un coût équivalant à la différence entre les bénéfices et les coûts de ces mesures.

52. Le tableau 1 récapitule les éléments de cette analyse provenant des résultats de la "stratégie politique #1 : taxe optimale sur le carbone" dans Cline (2004a).

**Tableau 1 : Coûts et avantages annuels d'une réduction optimale des émissions de carbone, 2005-2025**

	2005	2015	2025
Emissions industrielles de référence (GtC)	7.61	9.21	10.75
Emissions industrielles optimales (GtC)	4.64	5.34	6.03
Pourcentage de réduction des émissions (%)	39.0	42.0	44.9
Prix fictif du carbone (USD/tC)	171	208	242
Réduction optimale (GtC)	2.97	3.97	4.72
Bénéfices procurés par la réduction (milliards USD)	508.2	806.1	1154.0
Production mondiale (billions USD, prix de 1990)	48.3	61.1	74.5
Coûts de réduction en % de la production mondiale	0.49	0.61	0.72
Coûts de réduction (milliards USD)	236.5	372.6	536.6
Bénéfices nets de la réduction (milliards USD)	271.7	433.5	617.4
Bénéfices nets de la réduction, valeur actualisée	271.7	354.6	424.8

Source : Cline (2004a) et résultats non publiés de calculs sur modèle

53. Comme l'indique le tableau, les bénéfices nets d'une réduction optimale s'élèvent à environ 270 milliards USD par an en 2005, à 430 milliards USD en 2015 et à 620 milliards USD en 2025 (en prix de 1990). Après actualisation avec les taux indiqués dans Cline (2004a), soit 2 % dans la première décennie de la période de référence et 1.7 % dans la deuxième, les bénéfices actualisés ressortent à environ 350 milliards USD par an en 2015 et 425 milliards USD en 2025. Par conséquent, les bénéfices nets d'une adaptation optimale s'établissent à quelque 3 100 milliards USD pendant la première décennie (valeur actualisée calculée en moyennant les valeurs 2005 et 2015 et en cumulant sur 10 ans) et à quelque 3 900 milliards USD dans la deuxième décennie. Le coût d'un report de deux décennies de l'adoption de mesures visant à procurer la réduction optimale des émissions de carbone est donc estimé globalement à 7 000 milliards USD en valeur actualisée (prix de 1990).

54. Ce calcul postule qu'à la fin de la période de deux décennies, la réduction des émissions bondirait subitement pour s'aligner sur le chemin optimal identifié au départ. D'autres calculs seraient possibles en postulant une politique de "rattrapage" plus agressive dès la prise de décision des mesures de réduction, ce qui aurait pour effet de réduire le coût global d'un report parce que les émissions de carbone après 2025 seraient inférieures à celles résultant du chemin optimal initial et que les dommages seraient donc moindres. Quoi qu'il en soit, le calcul plus simple présenté ici constitue une référence montrant que les coûts économiques d'un report des mesures de réduction pourraient être considérables.

## Conclusion

55. Ce document se concentre premièrement sur les bénéfices et les coûts généraux de la réduction du réchauffement climatique et, deuxièmement, sur le calcul du coût d'un report des mesures d'intervention. Une autre méthode d'évaluation du "coût de l'inaction" consisterait à évaluer le coût d'une inaction totale. Si l'on utilise les estimations de Cline (2004a) à cet effet, la valeur actualisée des bénéfices de la lutte contre le réchauffement climatique est de 271 000 milliards USD dans l'hypothèse de la politique optimale identifiée et la valeur actualisée des coûts de cette lutte est de 128 000 milliards USD.

Le coût d'une inaction permanente totale représente donc une valeur actualisée de 143 000 milliards USD. Ce coût net tient déjà compte de l'adaptation, qui est intégrée en évaluant les dommages du réchauffement (c'est-à-dire que les dommages seraient supérieurs si l'on ne tenait pas compte de l'adaptation).

56. De nombreuses incertitudes caractérisent la politique de lutte contre le réchauffement climatique. Le paramètre de sensibilité climatique n'est pas sûr. La distribution des précipitations résultant d'un accroissement du réchauffement n'est pas sûre, et cette incertitude ne permet pas de savoir si l'agriculture de pays comme les Etats-Unis, par exemple, aurait plutôt tendance à profiter ou à souffrir d'une première phase de réchauffement modeste. Les émissions de référence ne sont pas sûres, à l'instar des taux de croissance de référence du PIB et de la population. La probabilité d'un arrêt du "tapis roulant océanique" si les niveaux de température étaient différents n'est pas sûre, pas plus que délai d'occurrence de cet éventuel phénomène.

57. Pour les responsables politiques, il s'agit d'adopter des réponses appropriées face à ces incertitudes et à d'autres relatives au réchauffement climatique. Il est important d'admettre que l'inaction n'est pas forcément la meilleure réponse à ces incertitudes. Si le public a de l'aversion pour le risque, un accroissement des incertitudes peut conduire à estimer qu'il vaut mieux réduire le délai d'inaction que l'augmenter. Dans la section qui précède, j'ai essayé d'évaluer le coût d'un report des mesures de réduction des émissions de carbone en m'appuyant sur mes travaux récents. L'estimation de 7 000 milliards USD pour un report de deux décennies laisse à penser que ces coûts pourraient être élevés.

58. De façon plus générale, je suis d'accord avec Schneider et Lane (2004) qui considèrent qu'en raison des non-linéarités et des surprises possibles, il est judicieux, par mesure de prudence, de "privilégier les mesures qui ralentissent le rythme auquel nous perturbons le système climatique" (c'est-à-dire les mesures de réduction des émissions) ... [et de] "ne pas se laisser piéger par la sagesse économique traditionnelle selon laquelle on commence par émettre et on lutte ensuite contre les émissions" (p. 138). Cette conclusion leur est dictée en partie à cause du rôle important des incitations aux changements technologiques qui sont contenues dans les politiques d'atténuation du changement climatique et qui permettent un passage plus efficace aux technologies non carbonées dans l'avenir.

59. Enfin, les questions examinées précédemment appellent à poursuivre la recherche dans au moins six domaines. Premièrement, il faut améliorer notre connaissance pour comprendre à partir de quel moment la fonction de dégradation globale agrégée due au réchauffement climatique devient négative. Hitz et Smith prennent soin de dire qu'ils ne connaissent pas le chemin de dégradation agrégée. Certains pourraient cependant interpréter à tort leur estimation, selon laquelle il y aurait, pour au moins quelques phénomènes importants, des retombées positives ou nulles à attendre tant que le réchauffement ne dépasse pas 3 ou 4°C, comme une incitation à ne rien faire pendant un certain temps parce qu'on est encore loin de ce niveau de réchauffement. L'étude de Jorgensen, Goettle, Hurd et Smith (2004) est particulièrement édifiante quant à notre ignorance de la nature positive ou négative des effets initiaux du réchauffement climatique dans la mesure où ils jugent sensiblement équivalente la probabilité des deux hypothèses (pour ce qui est des Etats-Unis) et évaluent, dans l'hypothèse d'un effet positif, le passage à un effet négatif uniquement à partir d'un réchauffement de 2.9°C (comme on l'a vu plus haut). La recherche permettra certainement de réduire cette marge d'incertitude.

60. Deuxièmement, il semblerait très utile pour les recherches futures de mieux connaître la distribution régionale probable des effets, et notamment de déterminer l'impact sur les pays en développement.

61. Troisièmement, il semblerait utile d'effectuer une enquête auprès du public pour savoir quelle "valeur d'existence" il accorde au fait d'éviter la perte massive de terres émergées qui résulterait d'un relèvement du niveau de la mer de sept mètres, en expliquant bien aux personnes interrogées que l'échelle

de temps pour que ce phénomène se réalise est de 1 000 ans. A l'heure actuelle, la littérature évoque apparemment cet effet comme le seul phénomène annonciateur qui puisse justifier de considérer comme dangereux un réchauffement climatique de 2°C. Il est donc important de savoir si un tel effet à une échéance de mille ans est jugé suffisamment dangereux par le grand public pour qu'il accepte de payer pour l'éviter.

62. Quatrièmement, il semblerait pareillement utile de mener une enquête auprès du public pour savoir dans quelle mesure celui-ci (et surtout peut-être les responsables politiques) préfère réellement évaluer une préférence "pure" pour le présent (intégrant le facteur d'impatience plutôt qu'une augmentation des revenus) à des échelles de temps d'un siècle ou plus. Une meilleure connaissance de cette échelle pourrait modifier sensiblement l'analyse globale en raison de l'importance déterminante de cet élément pour la comparaison des coûts et des bénéfices dans le temps.

63. Cinquièmement, il semblerait utile d'identifier le chemin de moindre coût des mesures de réduction des émissions en étudiant d'autres objectifs de stabilisation des concentrations atmosphériques de gaz à effet de serre.<sup>25</sup>

64. Sixièmement, il faut poursuivre la recherche pour intégrer correctement le phénomène d'adaptation dans la spécification de la fonction de dégradation liée au changement climatique.

---

<sup>25</sup> Il est à noter que Nordhaus et Boyer (2000) estiment le niveau de stabilisation au double des concentrations préindustrielles. Cependant, comme on l'a vu plus haut, leurs émissions de référence et leurs hypothèses de rétention atmosphérique paraissent sous-estimées. De plus, il conviendrait de disposer d'une série de chemins de réduction optimaux correspondant à différents objectifs de stabilisation.

## Références

- Abraham, Spencer, 2003. "Announcing the Climate Change Science Program 10-Year Strategic Plan in Washington, DC." (Washington: Department of Energy, July 24). Available at: [www.doe.gov](http://www.doe.gov).
- Adams, R.M., C. Rosenzweig, R. Peart, J. Ritchie, B. McCarl, J. Glycer, B. Curry, J. Jones, K. Boote, +L. Allen, 1990. "Global Climate Change and U.S. Agriculture." *Nature*, May, pp. 219-224.
- Andronova, Natalia G., and Michael E. Schlesinger, 2001. "Objective Estimation of the Probability Density Function for Climate Sensitivity," *Journal of Geophysical Research*, vol. 106, no. D19, pp. 22605-12.
- Arrow, K.J., W.R. Cline, K-G. Maler, M. Munasinghe, R. Squitieri and J.E. Stiglitz, 1996. "Intertemporal Equity, Discounting, and Economic Efficiency," in James P. Bruce, Hoesung Lee and Erik F. Haites, *Climate Change 1995: Economic and Social Dimensions of Climate Change* (Cambridge, England: Cambridge University Press for the Intergovernmental Panel on Climate Change), pp. 125-144.
- Arrow, Kenneth J., 1966. "Discounting and Public Investment Criteria." In A. V. Kneese and S. C. Smith, eds., *Water Research*, pp. 13-32. (Baltimore: Johns Hopkins University Press for Resources for the Future.)
- Ayres, R., and J. Walter, 1991. "The Greenhouse Effect: Damages, Costs and Abatement." *Environmental and Resource Economics*, vol. 1, pp. 237-270.
- Bradford, David F., 1975. "Constraints on Government Investment Opportunities and the Choice of Discount Rate." *American Economic Review*, vol. 65, no. 5, December, pp. 887-899.
- CBO, 2005. Congressional Budget Office, "Uncertainty in Analyzing Climate Change: Policy Implications." (Washington: CBO, January).
- Cline, William R., 1992. *The Economics of Global Warming* (Washington: Institute for International Economics)
- Cline, William R., 1997. "Modelling Economically Efficient Abatement of Greenhouse Gases. In Kaya Yoichi and Keiichi Yokobori, eds., *Environment, Energy, and Economy* (Tokyo: United Nations University Press, pp. 99-122).
- Cline, William R., 1999. "Discounting for the Very Long Term." In Portney and Weyant (1999), pp. 131-140.
- Cline, William R., 2004a. "Climate Change." In Lomborg, ed., pp. 13-43.
- Cline, William R., 2004b. "Rejoinder to Perspective Papers 1.1 and 1.2." In Lomborg, ed., pp. 56-61.
- DeCanio, Stephen J., Richard B. Howarth, Alan H. Sanstad, Stephen H. Schneider, and Starley L. Thompson, 2000. *New Directions in the Economics and Integrated Assessment of Global Climate Change*. (Washington: Pew Centre on Global Climate Change).
- Fankhauser, Samuel, 1995. *Valuing Climate Change: The Economics of the Greenhouse*. (London: Earthscan)

- Feldstein, Martin S., 1970. "Financing in the Evaluation of Public Expenditure." *Discussion Papers* 132. (Cambridge, MA: Harvard Institute of Economic Research, August).
- Hadley Centre, 2004. *Uncertainty, Risk and Dangerous Climate Change* (December).
- Hare, Bill and Malte Meinshausen, 2004. "How Much Warming Are We Committed to and How Much Can Be Avoided?" PIK Report No. 93 (Potsdam: Potsdam Institute for Climate Impact Research, October).
- Hare, Bill, 2005. "Relationship between Increases in Global Mean Temperature and Impacts on Ecosystems, Food Production, Water and Socio-economic Systems." Paper prepared for UK Met Office conference on Avoiding Dangerous Climate Change, 1-3 February 2005.
- Hitz, Sam, and Joel Smith, 2004. "Estimating Global Impacts from Climate Change," in OECD (2004), pp. 31-82.
- ICCT, 2005. International Climate Change Taskforce, *Meeting the Climate Challenge* (Washington: Centre for American Progress), January.
- IPCC, 1990. Intergovernmental Panel on Climate Change, *Scientific Assessment of Climate Change: Report Prepared for IPCC by Working Group I* (New York: World Meteorological Organization and United Nations Environment Programme).
- IPCC, 2001. J.T. Houghton et al, *Climate Change 2001: the Scientific Basis* (Cambridge, England: Cambridge University Press for the Intergovernmental Panel on Climate Change).
- Johnson, Jeff, 2004. "Putting a Lid on Carbon Dioxide," *Chemical and Engineering News*, December 20, pp. 36-42.
- Jorgenson, Dale W., Richard J. Goettle, Brian H. Hurd, and Joel B. Smith et. al., 2004. *U.S. Market Consequences of Global Climate Change*. (Washington: Pew Centre on Global Climate Change).
- Keeling, C.D., and T.P. Whorf, 2005. "Atmospheric Carbon Dioxide Record from Mauna Loa." (La Jolla, CA: Scripps Institution of Oceanography). Available at: <http://cdiac.esd.ornl.gov/trends/co2/sio-mlo.htm>.
- Lomborg, Bjorn, 2004. *Global Crises, Global Solutions* (London: Cambridge University Press).
- Maddison, D. J., 1994. "The Shadow Price of Greenhouse Gases and Aerosols." Processed, Centre for Social and Economic Research on the Global Environment (CSERGE), University College London and University of East Anglia, Norwich.
- Manne, Alan S., and Richard G. Richels, 2001. "U.S. Rejection of the Kyoto Protocol: the Impact on Compliance Costs and CO<sub>2</sub> Emissions." Processed. (Stanford, CA: Stanford University)
- Manne, Alan, 1992. *Buying Greenhouse Insurance: the Economic Costs of Carbon Dioxide Emission Limits* (Cambridge, MA: MIT Press).
- Meinshausen, Malte, 2004. "On the Risk of Overshooting 2°C." (Zurich: Swiss Federal Institute of Technology). Processed.
- Mendelsohn, Robert, 2004. "Alternative Perspectives." In Lomborg, 2004, pp. 44-48.

- Mishan, E. J., 1975. *Cost Benefit Analysis: An Informal Introduction*. (London: Allen & Unwin)
- Newell, Richard, and William Pizer, 2001. *Discounting the Benefits of Climate Mitigation: How Much Do Uncertain Rates Increase Valuations?* (Pew Centre)
- Nordhaus, William D., 1991. "To Slow or Not to Slow: The Economics of the Greenhouse Effect." *Economic Journal*, vol. 101, no. 407, pp. 920-937.
- Nordhaus, William D., 1994. *Managing the Global Commons: the Economics of Climate Change*. (Cambridge, MA: MIT Press).
- Nordhaus, William, and Joseph Boyer, 2000. *Warming the World: Economic Models of Global Warming* (Cambridge, Mass.: MIT Press)
- OCDE, 2004. *The Benefits of Climate Change Policies: Analytical and Framework Issues*. (Paris: Organisation de Coopération et de Développement Economique).
- Oppenheimer, Michael, and R.B. Alley, 2004. "Ice Sheets, Global Warming and Article 2 of the UNFCCC." (Princeton, NJ: Department of Geosciences, Princeton University). Processed. October.
- Pearce, D.W., W.R. Cline, A.N. Achanta, S. Fankhauser, R.K. Pachauri, R.S.J.Tol, and P. Vellinga, "The Social Costs of Climate Change: Greenhouse Damage and the Benefits of Control," in James P. Bruce, Hoesung Lee, and Erik F. Haites, eds., *Climate Change 1995: Economic and Social Dimensions of Climate Change* (Cambridge, UK: Cambridge Univ. Press for the Intergovernmental Panel on Climate Change), pp. 179-224.
- Peck, S. C., and T. J. Teisberg, 1992. "CETA: A Model for Carbon Emissions Trajectory Assessment." *Energy Journal*, vol. 13, no. 1, pp. 55-77.
- Portney, Paul R., and John P. Weyant, eds., 1999. *Discounting and Intergenerational Equity* (Washington: Resources for the Future).
- Ramsey, Frank P., 1928. "A Mathematical Theory of Saving." *Economic Journal*, vol. 138, no. 152, pp. 543-559.
- Schneider, Stephen, and Janica Lane, 2004. "Abrupt, Non-linear Climate Change and Climate Policy," in OECD (2004), pp. 83-110.
- Schneider, Stephen, and Starley L. Thompson, 2000. "A Simple Climate Model Used in Economic Studies of Global Change." In Stephen J. Decanio et al, *New Directions in the Economics and Integrated Assessment of Global Climate Change* (Arlington, VA: Pew Centre on Global Climate Change, October, pp. 59-80).
- SEI 2004. Stockholm Environment Institute, "Scoping Uncertainty in the Social Cost of Carbon," forthcoming.
- Smith, Vernon L., 2004. "Ranking the Opportunities," in Lomborg, 2004, pp. 630-38.
- Stokey, Nancy L., 2004. "Expert Panel Ranking," in Lomborg, 2004, pp. 639-44.

- Sundquist, Eric T., 1990. "Long-term Aspects of Future Atmospheric CO<sub>2</sub> and Sea-Level Changes." In Roger R. Revelle et al., *Sea-Level Change*, pp. 193-207. (Washington: National Research Council, National Academy Press).
- Tol, R.S.J., 1995. "The Damage Costs of Climate Change: Towards More Comprehensive Calculations." *Environmental and Resource Economics*, vol. 5, pp. 353-374.
- Tol, Richard S.J., Thomas E. Downing, Onno J. Kuik, and Joel B. Smith, 2004. "Distributional Aspects of Climate Change Impacts." *Global Environmental Change*, vol. 14, pp. 259-272.
- Union européenne (2004). Conseil de l'Union européenne, "Environnement." Communiqué de presse, 2610<sup>ème</sup> session du Conseil, 14 octobre. Disponible à l'adresse suivante : [http://ue.eu.int/ueDocs/cms\\_Data/docs/pressdata/fr/envir/82407.pdf](http://ue.eu.int/ueDocs/cms_Data/docs/pressdata/fr/envir/82407.pdf).
- USNCCA, 2001. United States National Climate Change Assessment, *U.S. Global Change Research Program* (Washington, DC).
- Weitzman, Martin L., 1998. "Why the Far-Distant Future Should Be Discounted at Its Lowest Possible Rate," *Journal of Environmental Economics and Management* 36 (3): pp. 201-08.
- Wigley, Tom, 2004. "Modelling Climate Change under No-Policy and Policy Emission Pathways." In OECD (2004), pp. 221-48.