

Article

Impacts du changement climatique et modélisation intégrée, la part de l'arbitraire

Philippe Ambrosi, Pierre Courtois

^a Économiste, CIRED CNRS, 45 bis avenue de la Belle Gabrielle, 94736 Nogent-sur-Marne cedex, France

^b Économiste, CODE, Universitat Autònoma de Barcelona, 08193 Bellaterra, Espagne

Évaluer les impacts à long terme du changement climatique, c'est-à-dire prévoir ce qui se passera dans un avenir éloigné jusqu'à un siècle, est une nécessité si l'on veut y faire face. En présentant les difficultés et les incertitudes inhérentes aux exercices d'évaluation intégrée, les auteurs reviennent sur le statut de l'expertise scientifique et ses liens avec la décision publique. On est là au cœur des conditions de production des savoirs et de prise des décisions en contexte incertain. On ouvre aussi un débat sur les opportunités de développement que l'adaptabilité au changement climatique peut générer. C'est une façon pour la revue de rappeler que la nécessité de proposer des modèles de plus en plus intégrés ne saurait occulter l'insuffisance de nos connaissances et la fragilité de nos projections.

La Rédaction

Mots-clés :

impacts climatiques ;
fonction de réponse ;
modélisation intégrée ;
incertitudes

Résumé – Dans quelle mesure les États doivent-ils infléchir leurs émissions actuelles et futures de gaz à effet de serre? Les modèles d'évaluation intégrée, assemblages d'informations issues de différentes disciplines scientifiques, sont communément devenus l'une des passerelles entre les sphères scientifique et politique. Sans toujours constituer des boîtes noires, ces modèles sont particulièrement complexes et reposent sur des hypothèses restrictives. Les résultats qui en sont tirés doivent donc être appréhendés en connaissance de cause et, en aucun cas, ne constituent des « vérités scientifiques ». L'objet de cet article est d'approfondir certaines de ces hypothèses. Plus précisément, l'analyse est consacrée à l'exposé des incertitudes inhérentes aux méthodes de représentation formelle des impacts du changement climatique. L'approche suivie en matière d'évaluation des impacts est en effet déterminante dans les résultats fournis par les modèles intégrés fondés sur l'approche coût-avantage. Il convient d'en souligner les principales caractéristiques et limites.

Keywords:

climatic impact;
response function;
integrated modelling;
uncertainty

Abstract – **The impact of climate change and integrated modelling: the share of uncertainty.** To what extent should States curb current and future greenhouse gas emissions? Integrated assessment models are commonly used to build or at least legitimize policy making. Although these models should not be viewed automatically as black boxes, they are particularly complex and are built on restrictive assumptions. Hence results derived from such models need to be taken with caution and on no account as "scientific truth". The aim of this paper is to provide a deeper insight into some of the key methods and assumptions these models are based on. We focused our work on climate change response functions. Assumptions and methods selected to evaluate the influence of climate change impacts will indeed strongly orientate the results derived from integrated assessment models based on cost-benefit concepts. It is therefore essential to point out their chief characteristics and limitations.

De nombreuses définitions de l'évaluation intégrée sont proposées dans la littérature. La plus communément rencontrée est certainement celle du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC) : « *Assessment is integrated when it draws on a broader set of knowledge domains that are represented in the research product of a single discipline. Assessment is distinguished from disciplinary research by its purpose: To inform policy and decision making, rather than advance knowledge for its intrinsic value* » (Weyant *et al.*, 1996). Le terme « intégré » fait donc référence au caractère pluridisciplinaire de l'approche, celui « d'évaluation » à son application en matière d'aide à la décision. Si l'idée est séduisante au premier abord, il faut toutefois rester prudent quant à l'applicabilité de ces évaluations.

L'objectif de cet article¹ est de mettre en évidence les principales incertitudes et limites inhérentes à la représentation des impacts du changement climatique dans les modèles intégrés, et d'étudier leurs implications pour la prise de décision. Les hypothèses implicitement posées afin de modéliser les fonctions de réponse amènent en effet à s'interroger sur le rôle de main invisible qu'elles exercent sur les recommandations, pour le moins optimistes, de certains modélisateurs. Pratiquant nous-mêmes la modélisation intégrée, notre propos n'est évidemment pas de condamner en bloc cet instrument au demeurant très instructif. Il est toutefois nécessaire de définir clairement son statut vis-à-vis du décideur, qui en aucun cas ne peut se prévaloir de disposer d'un outil de décision prescriptif.

Dans une première section, nous présentons la modélisation intégrée du changement climatique et mettons en exergue l'importance que jouent les impacts du réchauffement dans ce type d'approche. La section suivante est consacrée à l'analyse des hypothèses et méthodes utilisées pour synthétiser ces impacts dans les modèles. Nous expliquons ce que sont les fonctions de réponse et mettons en évidence les principales limites qui les caractérisent. Nous concluons l'article en discutant du statut de la modélisation intégrée du changement climatique pour la prise de décision.

Modélisation intégrée et changement climatique

Les modèles intégrés du changement climatique cherchent à capturer, dans une architecture cohérente, la chaîne causale qui conduit des déterminants des émissions de gaz à effet de serre (GES) aux impacts du

changement climatique et à leurs répercussions socio-économiques. Il s'agit donc d'une approche interdisciplinaire, entre sciences de l'environnement (climatologie, océanographie, écologie. . .) et sciences sociales (économie, sciences et techniques de l'ingénieur. . .). Ce principe guide la typologie de Rotmans et Dowlatabadi (1998), selon laquelle se distinguent :

- (i) les modèles d'orientation macro-économique, qui représentent sous forme de relations paramétriques relativement simples les phénomènes naturels ;
- (ii) les modèles d'orientation géophysique, qui représentent de manière exhaustive les processus physiques étudiés.

Les premiers sont pour la plupart des modèles de fondement néoclassique d'équilibre partiel ou général. Ils reposent sur des concepts économiques traditionnels en ce qui concerne l'optimisation et l'accumulation du capital et portent assez peu d'attention aux dynamiques environnementales. Leur principale difficulté, nous allons le voir, provient de l'internalisation des processus naturels dans le modèle économique (définition des fonctions d'impact et des fonctions d'utilité à l'interface économie/environnement). Les seconds sont axés sur des descriptions exhaustives des processus géophysiques et de leurs rétroactions, mais représentent de manière inadéquate le système socioéconomique.

Un outil d'évaluation destiné aux preneurs de décision

La construction de tels édifices, qu'ils soient d'orientation économique ou géophysique, n'est pas sans soulever un certain nombre de difficultés, compte tenu du caractère interdisciplinaire de la démarche, de sa relative nouveauté et des complexités qui la caractérisent à multiples niveaux. Ces différents obstacles ont conduit les modélisateurs à formuler des hypothèses parfois arbitraires et à introduire des approximations multiples pour pallier les lacunes de nos connaissances, encadrer des incertitudes que l'on peut qualifier de gigantesques et maintenir ces modèles à un niveau de complexité numérique raisonnable.

Dans ce contexte, il est naturel de s'interroger sur la fiabilité de la représentation des risques induits par le changement climatique et sur la validité des recommandations pour l'action que produisent les modèles intégrés. Il est d'ailleurs intéressant d'observer l'évolution, au cours des dix dernières années, du regard porté par la communauté scientifique sur ces questions. En 1996, le GIEC émet des mises en garde sur la nature de ces approches, une partie du rapport est cependant consacrée à la comparaison des différents modèles existants. La communauté scientifique y accorde donc un crédit

¹ Cet article a été présenté lors de la 3^e Journée d'études du Pôle européen Jean Monnet, « Activités humaines, risques et dommages écologiques », Université de Metz, 6 novembre 2002. Nous remercions l'Union européenne pour son financement, contrat HPMF-CT 2000-00855.

certain et les recherches en ce domaine s'intensifient. Un numéro spécial de l'*Energy Journal* (vol. 20, 1999 *Special Issue: The Costs of the Kyoto Protocol: a Multi-model Evaluation*) est d'ailleurs dédié, en 1999, à la comparaison des résultats des modèles coût-avantage discutant timing et efficacité économique de l'action. Une vingtaine de modèles intégrés sont recensés à cette période et, dans l'ensemble, ceux-ci s'accordent à recommander un effort modeste de réduction des émissions – modeste, c'est-à-dire largement inférieur aux engagements contenus dans le protocole de Kyoto. Parmi ces contributions, Nordhaus et Boyer (1999), modèle RICE à l'appui, présentent, dans un « requiem pour Kyoto », des évaluations qui mettent en évidence l'inefficacité du protocole. Une année plus tard, un autre spécialiste renommé, Robert Mendelsohn, présente au sénateur McCain une lettre dans laquelle il lui communique des résultats particulièrement optimistes sur les impacts positifs du changement climatique à moyen terme (Mendelsohn, 2000). Pourtant, malgré les importants progrès en matière de compréhension et de modélisation des impacts du changement climatique, le dernier rapport en date du GIEC (McCarthy *et al.*, 2001) ne consacre qu'une attention mineure à ces évaluations monétaires, jugées trop incertaines. Dans ce prolongement, la littérature récente semble se garder de formuler des recommandations pour les décideurs. Seuls trois grands modèles intégrés coût-avantage, à savoir FUND, MERGE et RICE, sont d'ailleurs aujourd'hui maintenus. En revanche, les débats scientifiques se multiplient, en particulier sur le statut d'utilisation des modèles intégrés, pour éclairer la décision, tant l'incertitude sur les impacts est importante. Commençons d'en mesurer les difficultés multiples pour les appréhender.

Le problème épineux des impacts du changement climatique

Par définition, nous employons le terme impact afin d'exprimer la variation de bien-être des populations provoquée par les rétroactions du changement climatique sur les systèmes naturels et l'activité humaine. Ces rétroactions sont nombreuses, d'autant qu'elles sont parfois enchevêtrées. Afin de cerner les principaux impacts, nous présentons (Tab. 1) une typologie selon les trois canaux par lesquels ils s'exercent².

Il y a loin, en fait, des altérations provoquées par le changement climatique aux impacts. C'est leur répercussion au travers des tissus économiques et sociaux qui

conduit, in fine, aux impacts. Citons par exemple les effets de synergie (diminution du rendement des cultures et tensions sur les ressources en eau, avec des impacts non négligeables pour des systèmes de production intensive irriguée), les effets de propagation sectoriels et régionaux (conséquences socioéconomiques d'un choc dramatique sur une culture minière comme le café), l'inflexion des dynamiques économiques de long terme (baisse de productivité, accélération de l'obsolescence du capital installé, perte de confiance des investisseurs devant des projets devenus plus risqués) et les risques d'une maladaptation en raison de l'incertitude sur les impacts futurs.

Cette distinction entre altération et impact n'est pas fortuite, car autant notre connaissance des altérations induites par le changement climatique sur l'environnement et les sociétés croît sans cesse, autant notre connaissance des chemins qui conduisent de ces altérations « directes » aux impacts reste limitée. Nous nous en rendons compte de manière plus systématique dans la section suivante où nous passons en revue les limites des évaluations monétaires des impacts qui nourrissent les modèles intégrés.

La construction des fonctions de réponse

Par définition, une fonction de réponse est une trajectoire permettant d'exprimer, à l'instant t , les impacts d'un changement du climat. La vocation de cette fonction est donc de synthétiser les différents impacts décrits ci-avant selon l'intensité du changement climatique et la période considérée. Cette synthèse nécessite un numéraire commun pour réduire la variété des impacts locaux en un ensemble d'indicateurs intégrables dans une structure coût-avantage. Afin de comparer les impacts évités aux coûts de réduction d'émission, la métrique naturellement utilisée est l'unité monétaire. Cela ne va pas sans poser de problèmes, puisque la plupart des impacts sont difficiles à monétiser.

L'écriture de ces fonctions passe par trois étapes dont chacune est caractérisée par l'introduction d'approximations plus ou moins arbitraires. La première étape est l'évaluation de l'impact physique d'une variation discrète de la température dans chacun des secteurs menacés (*i.e.* les secteurs agricole et forestier, la santé, les zones côtières, etc.) et ce, pour chaque région considérée. Elles indiquent par exemple qu'en 2060, à une variation de 2,5 °C de la température moyenne, le niveau de la mer en Europe s'élève approximativement de 40 cm. Une deuxième étape consiste à transcrire ces impacts physiques en impacts monétaires. On estime, par exemple, le coût des côtes inondées selon la valeur des activités agricoles, productives (tourisme balnéaire, activités portuaires) et des infrastructures vulnérables. Des règles de valeurs sont assignées à des impacts qui affectent des spectres aussi divers que la préservation des fonds marins, celle d'espèces tropicales, ou encore la recrudescence

² Pour des exemples spécifiques au cas français, le lecteur peut se reporter à Deneux (2002), aux résultats du projet ACCIA pour la situation à l'échelle européenne (Parry, 2000) et, pour une revue globale, par région et par secteur, au GIEC (McCarthy *et al.*, 2001) et à Smith et Hitz (2002).

Tableau 1. Typologie des impacts.

Altérations	Description
(1) Capital naturel	L'activité économique dérivée du secteur primaire, les ressources en eau, le secteur touristique et la santé humaine sont directement dépendants de la qualité de l'environnement, capital naturel que pourrait dégrader le changement climatique. Pour l'agriculture, par exemple, si une grande majorité des études n'envisagent pas de rupture à l'échelle globale de l'équilibre offre/demande de biens agricoles, elles s'accordent sur une transformation importante de la géographie de la production, avec des risques aggravés pour la sécurité alimentaire des zones vulnérables – notamment le continent africain où le changement climatique pourrait remettre en cause l'existence même d'économies de subsistance.
(2) Capital productif	Tempêtes, inondations, montée du niveau de la mer, glissements de terrain et autres risques naturels renforcés par le changement climatique pourraient obliger soit à construire des équipements plus robustes et donc plus coûteux, soit à les renouveler plus fréquemment, soit enfin à les abandonner avant leur obsolescence normale. Par exemple, le dégel permanent ou saisonnier du permafrost dans les zones montagneuses et boréales aura des conséquences sur la stabilité des terrains. Selon Weller et Lange (1999), en l'absence de mesures particulières, la plupart des constructions actuelles des villes du bassin de la Léna seraient inutilisables vers 2030. L'instabilité du sol dans ces régions aura des conséquences importantes pour les routes, les pistes d'atterrissage, les pipelines et toute l'industrie minière.
(3) Aménités	Enfin, l'évaluation des risques ne peut ignorer les satisfactions présentes et futures retirées des services offerts par l'environnement. Ce sont, par exemple, la valeur que l'on accorde à un régime climatique donné (et que reflètent les valeurs foncières, dans une certaine mesure), les préoccupations qu'engendrent les risques pour la biodiversité (les récifs coralliens) et les paysages (les glaciers de montagne) – et qui peuvent donner lieu à des valeurs d'option, des valeurs de legs ou d'existence.

de maladies infectieuses dans certains pays d'Afrique. Ces évaluations discrètes permettent dans une dernière étape d'extrapoler des fonctions de réponse sectorielles qui, une fois agrégées, fournissent une fonction de réponse globale pour chacune des régions étudiées.

Les deux premières étapes : l'évaluation des impacts monétaires de variations discrètes de la température

En dépit d'un grand nombre d'incertitudes et d'informations absentes, trois études ont pris le risque de mettre en perspective une information très hétérogène sur les impacts sectoriels et régionaux du changement climatique (Tab. 2). Elles fournissent une quantification monétaire ponctuelle des impacts, c'est-à-dire l'évaluation d'un triplet discret (Δ température, date, impact monétaire). Selon les études, ce triplet correspond aux impacts monétaires d'une augmentation de température globale, variant de 1 à 2,5 °C, à l'horizon 2060. De telles évaluations ne donnent donc pas d'image des risques à long terme ni des risques associés à un réchauffement plus important. En outre, elles suivent une approche statique et ne prennent pas en compte le rythme auquel se poursuit le changement climatique.

Malgré tout, ces travaux sont un jalon dans l'histoire de la modélisation. Au-delà des modèles pour lesquels ils ont été entrepris³, ils sont d'ailleurs très largement repris dans la littérature pour donner des ordres de grandeur des vulnérabilités au changement climatique. Cependant, et leurs auteurs sont souvent les premiers à le noter, ils restent entachés d'un certain nombre de limites. Les résultats des trois études présentées au tableau 2 en témoignent, avec des écarts très significatifs allant jusqu'à l'anticipation d'impacts de signe opposé. Ainsi, par exemple, quand Nordhaus évalue des impacts négatifs (donc des dommages) aux États-Unis pour une élévation de la température de 2,5 °C, Tol et Mendelsohn, pour des élévations de température de 1 et 2 °C, évaluent des impacts positifs (donc des gains).

Si ces écarts sont partiellement imputables à des différences de nomenclature régionale et sectorielle, ils témoignent principalement des approximations multiples qui accompagnent ce type d'évaluation. Les passer toutes en revue serait aussi laborieux qu'inutile. Nous nous

³ Ainsi, les travaux de Nordhaus et Boyer (1999) pour le modèle RICE (*Regional Integrated model of Climate change*), ceux de Tol (1997) pour le modèle FUND (*Climate Framework for Uncertainty, Negotiation and Distribution*) et ceux de Mendelsohn et al. (1997) pour le modèle GIM (*Global Impacts Model*).

Tableau 2. Estimations régionalisées des impacts du changement climatique.

% du PIB régional	Nordhaus		Mendelsohn <i>et al.</i>		Tol
	+2,5 °C	+1,5 °C (a)	+2 °C (b)	+2,5 °C (a)	+1 °C
Am. du Nord			0,3		3,4 (1,2)
	<i>USA</i>	-0,5		0,3	
OCDE Europe			0,4		3,7 (2,2)
	<i>UE</i>	-2,8			
OCDE Pacifique					1,0 (1,1)
	<i>Japon</i>	-0,5		-0,1	
Europe de l'Est/CEI			1,1		2,0 (3,8)
	<i>Europe de l'Est</i>	-0,7		11,1	
	<i>Russie</i>	0,7			
Moyen-Orient		-2,0			1,1 (2,2)
Am. latine			-1,3		-0,1 (0,6)
Asie du Sud et Sud-Est			-0,8		-1,7 (1,1)
	<i>Inde</i>	-4,9	-2,0		
Chine		-0,2	0,4	1,8	2,1 (5,0)
Afrique		-3,9	-4,7		-4,1 (2,2)
Total mondial		-1,5	0,09	-0,3	0,1
				0,1	2,3 (1,0)

Source : Nordhaus et Boyer (1999), Tol (1999a), Tol (1999b), Mendelsohn et Neumann (1999) et Mendelsohn *et al.* (2000). Les nombres négatifs (resp. positifs) désignent des pertes (resp. gains) ; les chiffres entre parenthèses sont des écarts type (en fait, des bornes inférieures de l'incertitude).

contentons donc de les illustrer à travers deux exemples (Encadré 1).

Deux principales limites permettent de résumer les approximations qui les entourent : ce sont des approches lacunaires et extrêmement incertaines. Elles sont lacunaires tant dans leur couverture sectorielle que géographique. Ainsi, parmi les secteurs affectés non évalués, nous recensons les ressources halieutiques, le secteur de l'assurance, les transports, les infrastructures, le tourisme et les aménités offertes par le climat et la nature. Par ailleurs, peu d'informations sont disponibles pour les pays en développement. Les évaluations reposent alors bien souvent soit sur quelques estimations très localisées étendues à l'ensemble de la région (qui a parfois la taille d'un continent), soit sur des extrapolations à partir des impacts évalués dans les pays développés. De plus, ni les synergies entre catégories d'impact ni les probables propagations sectorielle et régionale des impacts ne sont considérées. Par exemple, les conflits, les migrations forcées ou les famines causées indirectement par le changement climatique.

Elles pâtissent en outre de toutes les incertitudes à l'œuvre qui s'amplifient au long de la chaîne causale conduisant des émissions de GES aux impacts : incertitudes sur les projections socioéconomiques de très long

terme (notamment les scénarios d'émissions) ; sur l'évolution des différents climats régionaux ; sur l'adaptabilité de nos économies à ces changements ; sur la valorisation économique des impacts.

Intéressons-nous plus particulièrement à ces deux derniers points. Rappelons que les potentiels d'adaptation sont l'ensemble des stratégies mises en œuvre pour réduire notre vulnérabilité au changement climatique ou tirer profit de nouvelles opportunités. Ils constituent donc un élément-clé dans l'évaluation des impacts : des hypothèses optimistes diminueront le montant des impacts résiduels et vice-versa. Or, ces hypothèses sur les stratégies d'adaptation restent très incertaines. En particulier, nous connaissons mal leur disponibilité effective (selon le scénario de développement), leur potentiel réel à réduire la vulnérabilité et les déterminants de leur mise en œuvre.

Les incertitudes liées à la valorisation monétaire des impacts sont plus problématiques encore et soulèvent deux grandes questions :

- (i) La première concerne la valorisation de tous les impacts qui ne sont pas directement en prise avec les activités productives et pour lesquels il est donc difficile d'obtenir une première mesure exprimée en termes monétaires. Ce sont, par exemple, les pertes

Encadré 1. Méthodes d'évaluation : deux exemples

a. La montée des eaux

Tol l'évalue en comptabilisant les coûts de protection des côtes, les pertes de « terres humides » et les pertes de « terres sèches ». Il ajoute à ces dernières le coût de la migration humaine. Ne connaissant pas les efforts de protection à venir – variable fortement corrélée à la perte des « terres sèches » –, il considère une politique à moindre coût. Chacune de ces variables est évaluée pour une montée de 1 mètre du niveau de la mer. En ce qui concerne « terres humides » et « terres sèches », les profits retirés sont évalués en moyenne au mètre carré dans chaque région (prix du mètre carré à l'achat à la date t), puis sont multipliés par l'étendue des côtes. Une évaluation moyenne est dérivée selon la même méthode en ce qui concerne les coûts de protection des côtes. Nordhaus, pour sa part, s'appuyant sur les études présentées par le GIEC (Bruce *et al.*, 1996) d'une évaluation de la montée des eaux aux États-Unis, fixe arbitrairement à 0,1 % du revenu annuel la valeur permettant de prévenir les conséquences d'un réchauffement de 2,5 °C. Les valeurs des impacts dans les autres régions sont extrapolées à partir de ce pourcentage. Un indice de la vulnérabilité côtière par région est défini, en faisant l'hypothèse qu'elle est fonction de la racine carrée du ratio entre étendues des zones côtières et des zones continentales. L'évaluation des impacts est alors obtenue en multipliant cet indice par le PIB régional.

b. La dégradation des écosystèmes

Elle est évaluée sur les bases d'une loi de proportionnalité entre consentement à payer et PIB. S'il est intuitif de juger que plus un individu est riche et plus la valeur qu'il accorde aux espèces en voie de disparition est importante, la loi déduite d'une évaluation contingente reste arbitraire. Tol (1999a) l'évalue sur les bases des évaluations contingentes de Pearce (1993), Fankhauser (1995) et Manne et Richels (1995). Il considère que quels que soient les impacts subis, un individu dont le revenu est équivalent au revenu moyen par habitant de l'OCDE en 1990 est prêt à donner 50 \$ pour préserver les écosystèmes. Selon que cet individu sera plus ou moins riche, Tol considère qu'il sera proportionnellement plus ou moins enclin à préserver l'environnement. Il s'ensuit que la valeur des écosystèmes est uniquement corrélée aux estimations de croissance des PIB et des populations. Nordhaus et Boyer (1999), pour leur part, présentent leur propre évaluation contingente. Elle se résume à considérer que chaque région est prête à payer 1 % de la valeur du système vulnérable chaque année afin d'assurer sa préservation.

d'aménités et le degré de confort, les risques sanitaires ou encore les pertes écologiques. En principe, la valorisation de ces dernières ne devrait pas poser problème. Un vaste champ de l'économie de l'environnement est en effet consacré à des méthodes d'évaluation des actifs environnementaux. Nous disposons de l'évaluation directe à partir des prix du marché, et de l'évaluation indirecte à partir de l'appel aux marchés de substitution (coûts de remplacement, dépenses de protection, coûts de transport, prix hédonistes) ou aux marchés hypothétiques (évaluation contingente). Dans la pratique, cependant, leur application au cas du changement climatique ne laisse pas de soulever un certain nombre de difficultés. Dans beaucoup de régions, d'abord, les données manquent pour appliquer l'une ou l'autre de ces méthodes⁴. De plus, quand des travaux sont disponibles, ils correspondent bien souvent à des évaluations pour un écosystème et à un emplacement donné. Les risques que fait peser le changement climatique – par exemple les migrations d'écosystèmes, voire leur disparition irréversible – sont pourtant faiblement comparables.

(ii) La seconde question a trait aux difficultés de la valorisation des impacts dans un monde où ils sont très inégalement répartis. Comment comparer et agréger les évaluations monétaires des impacts quand ils portent d'un côté sur la situation de sociétés riches

et industrialisées et, de l'autre, sur la situation de nations dont la plupart des individus s'efforcent simplement de survivre au quotidien ? Ces difficultés se doublent souvent de controverses liées aux principes mêmes de la valorisation, soit qu'on la refuse pour des impératifs moraux ou, dans une perspective moins catégorique, en raison d'une suspicion soutenue à l'égard des méthodes employées (comment l'analyse coût-avantage traite des impacts irréversibles et des compensations entre groupes), soit qu'on l'accepte avec les questions que soulèvent les considérations d'équité (de quel point de vue on pratique l'évaluation : émetteur d'un pays développé ou victime d'une région vulnérable). Ainsi les vifs débats qui ont suivi la publication du second rapport du GIEC (Watson *et al.*, 1996), débats qui ont cristallisé autour des questions de valorisation des risques pour la santé humaine (où une vie perdue/sauvée au Bangladesh vaut moins qu'une vie perdue/sauvée en Europe). Plus d'un en aura été choqué, soit à l'idée même d'attribuer une valeur à la vie humaine, soit à l'idée qu'un même impact n'ait pas la même valeur selon l'endroit où il se produit. Toute la difficulté, pour l'économiste, est donc d'assurer la cohérence entre positions éthiques (dont les visions de l'équité) et évaluation des impacts.

En définitive, notre connaissance des impacts du changement climatique reste à ce jour parcellaire et encore très incertaine. Nous disposons en fait d'un chiffrage approximatif des impacts supportés dans quelques

⁴ Sans parler du fait que nous ne savons pas comment évolueront les préférences de nos descendants vis-à-vis de l'environnement.

décennies par les activités économiques, dans les régions développées pour un climat déplacé vers un nouvel équilibre. C'est avec prudence qu'il faut accueillir les résultats de ces travaux. Ils donnent, en effet, l'idée d'un changement climatique relativement maîtrisable, mais occultent, entre autres, la question des risques de long terme ou du déclenchement de crises graves dans les régions en développement. Ces différents problèmes se répercutent dans l'écriture des fonctions de réponse utilisées dans les modèles intégrés, car elles sont extrapolées à partir de ces évaluations discrètes.

L'extrapolation d'une fonction

La troisième étape consiste à écrire une fonction de réponse pour décrire les impacts monétaires associés à n'importe quelle variation de la température au cours des cent prochaines années. On comprendra que l'estimation d'une telle fonction est plus problématique encore que l'estimation des impacts monétaires d'une augmentation discrète de la température à un instant donné. En effet, cette estimation correspond à un point unique parmi l'infinité de points constituant la fonction de réponse. Disposer de multiples évaluations permettrait d'extrapoler une fonction de réponse sans perte de généralité. Malheureusement, nous l'avons vu, les rares estimations discrètes actuelles se concentrent sur un réchauffement modéré à court terme et, surtout, elles ne sont pas comparables entre elles. L'extrapolation de la fonction doit, par conséquent, être effectuée sur cet unique point d'étalonnage et ce, en stipulant de nouvelles hypothèses cette fois sur les variables et les tendances qui caractérisent les trajectoires d'impacts. Pour comprendre les incertitudes liées à l'extrapolation des fonctions de réponse, nous présentons les principaux facteurs qui caractérisent la relation entre impacts, température et temps. Nous relevons ensuite les caractéristiques des impacts qui sont retenues par la littérature, pour choisir la forme fonctionnelle qui semble la plus appropriée. La signification des différentes formes fonctionnelles et les méthodes de calibration sont alors présentées au regard des facteurs mis en évidence.

Les facteurs liant impacts, température et temps

Les études d'impact font toutes référence à l'amplitude du réchauffement, aux impacts physiques qui lui correspondent et aux impacts monétaires associés. Par définition, les modèles intégrés sont intergénérationnels et, pour être opérationnelle, la fonction de réponse doit représenter l'impact monétaire du réchauffement quel que soit le moment auquel il a lieu. Or, une augmentation moyenne de la température n'a pas les mêmes conséquences selon qu'on se situe en 2030 ou en 2070. En effet, l'activité économique en 2070 ne sera pas la même qu'en

2030. Les régions du monde seront plus riches, technologiquement plus développées, avec des champs de spécialisation différents, des populations plus ou moins importantes, des caractéristiques sociopolitiques et socioculturelles qui auront évolué. Par exemple, l'évolution technologique et le développement économique se faisant, une économie principalement agricole pourra être très vulnérable au changement climatique en 2030 et l'être beaucoup moins en 2070. De plus, le rythme auquel ce réchauffement a lieu est important : si une augmentation de la température advient très rapidement, les économies y seront d'autant plus sensibles puisque faiblement adaptables. Le principal problème qui se pose est que le succès des stratégies d'adaptation dépend, d'une part, de la capacité à détecter ou prévoir une modification du climat et à planifier des mesures, et, d'autre part, de la rapidité de la mise en œuvre de telles mesures, d'autant plus ralentie que l'inertie socioéconomique est élevée. L'incertitude sur le rythme du réchauffement autant que sur l'inertie de la réaction rend par conséquent difficile la prise en compte de l'interconnexion du temps sur les niveaux d'impacts monétaires.

Sept principaux facteurs, souvent autocorrélés, permettent d'expliquer la valeur à un instant t de la réponse d'une économie à une variation de la température :

- (i) la sensibilité régionale au changement climatique ;
- (ii) la variation de la température ;
- (iii) le rythme auquel cette variation a lieu ;
- (iv) le niveau de développement socioéconomique des régions ;
- (v) le niveau de développement technologique ;
- (vi) l'anticipation du niveau et du rythme de variation ;
- (vii) l'inertie autour des facteurs d'adaptation (réactivité politique et technologique).

Évaluer le poids de chacun de ces facteurs permettrait de mesurer la vulnérabilité d'une économie à un changement climatique donné, quel que soit le moment où il a lieu. Le problème est que nos connaissances sur le rôle de ces facteurs et leur autocorrélation restent marginales. Il est donc nécessaire de spéculer une forme fonctionnelle qui, d'une part, puisse être étalonnée et, d'autre part, corresponde aux principales caractéristiques des impacts mises en évidence dans la littérature.

Étant donné qu'un unique triplet discret (Δ température, date, impact monétaire) est connu, une infinité de formes fonctionnelles peuvent être proposées. En amont du choix de la forme fonctionnelle, on doit par conséquent formuler des hypothèses sur les caractéristiques des trajectoires d'impacts. Ces hypothèses concernent, par exemple, l'amplitude des impacts, leur signe, la représentation de catastrophes économiques, etc.

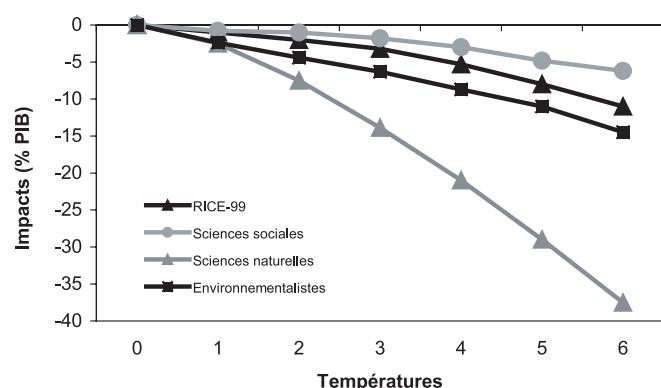


Fig. 1. Formes fonctionnelles spéculées.

Hypothèses et caractéristiques retenues

Nordhaus (1994a) présente une étude sur les opinions d'environnementalistes et d'experts en sciences sociales et en sciences naturelles. Il constate une forte diversité de points de vue, notamment entre sciences naturelles et sociales (Fig. 1).

Si chacun des groupes s'accorde sur la forme globale de la fonction (*i.e.* convexe : une variation de la température implique des dommages plus que proportionnels), l'amplitude monétaire qu'engendreraient des événements catastrophiques (*e.g.* $\Delta T = 6^\circ\text{C}$ en 2090) est anticipée en moyenne du simple au sextuple. Ceci met en évidence l'importance de la formation, des traditions et de la vision du monde du scientifique qui opère l'analyse : selon les cas, il proposera des hypothèses plus ou moins optimistes en matière de valorisation. Seuls des économistes se sont risqués à construire ces fonctions. Nous constatons d'ailleurs, dans la figure 1, que la forme fonctionnelle présentée par Nordhaus et Boyer (1999) est proche de celle postulée par les experts en sciences sociales. En d'autres termes, c'est le scénario d'impact le plus optimiste qui est retenu⁵.

Sept caractéristiques des trajectoires d'impacts sont mises en évidence dans la littérature. Elles permettent de discuter du choix des variables et des formes fonctionnelles qui sont retenues :

- (i) sensibilité : les régions les plus pauvres sont les plus sensibles au changement climatique ;
- (ii) impacts négatifs : les impacts du changement climatique sont plutôt des dommages que des gains ;
- (iii) impacts positifs : pour des augmentations relativement faibles de la température, certaines régions peuvent être bénéficiaires ;
- (iv) non-linéarité : les impacts sont plus que proportionnels à la variation de la température ;

⁵ Notons que cette tendance se confirme dans les formes fonctionnelles proposées par Tol (1999a et b), qui adopte des hypothèses plus optimistes encore et présente, en conséquence, des dommages d'autant plus faibles.

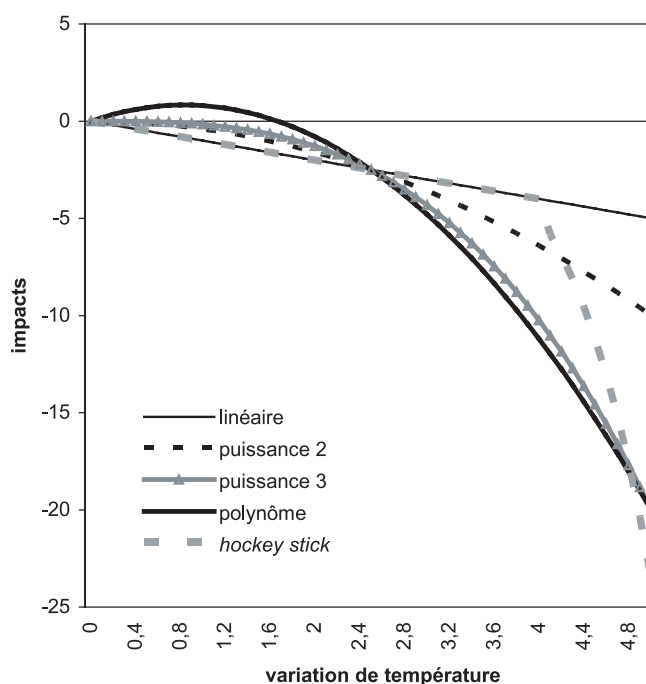


Fig. 2. Formes fonctionnelles rencontrées.

- (v) catastrophe : des événements extrêmes à partir de certains seuils de température peuvent être très dommageables ;
- (vi) rythme : plus le changement climatique est rapide, plus les dommages sont potentiellement importants (adaptation) ;
- (vii) timing : un même impact n'a pas le même coût en 2000 et en 2100.

Cinq formes fonctionnelles sont rencontrées (Fig. 2 et Tab. 3). Alors que les approches dites de première génération se sont plutôt tournées vers des trajectoires puissance, voire linéaire (Hope *et al.*, 1993 ; Nordhaus, 1994b ; Peck et Teisberg, 1992 ; Plambeck *et al.*, 1997 ; etc.), celles dites de seconde génération leur préfèrent des formes polynomiales d'ordre 2 (Mendelsohn *et al.*, 1997 ; Mendelsohn *et al.*, 2000 ; Nordhaus et Boyer, 1999 ; Tol, 1999a et b).

Cette évolution du choix de la forme fonctionnelle retenue est liée à la mise en évidence progressive des caractéristiques des trajectoires du changement climatique. En premier lieu, la littérature s'est concentrée sur l'occurrence des non-linéarités (Nordhaus, 1994b ; Peck et Teisberg, 1993 ; Yohe et Garvey, 1995, etc.). Ne disposant que d'un unique point d'étalonnage, les fonctions puissance sont des candidates idéales pour représenter des impacts croissant rapidement. Le débat s'articule initialement sur le paramétrage de ces formes spécifiques. En particulier, Peck et Teisberg (1993) montrent que les politiques climatiques sont beaucoup plus sensibles à l'incertitude sur le paramétrage de la forme de la fonction de réponse qu'à l'incertitude relative au niveau d'impacts

Tableau 3. Formes fonctionnelles et caractéristiques.

	Formes simplifiées	Sensibilité	Impacts négatifs	Non-linéarité	Impacts positifs	Catastrophe	Modèles
Linéaire	$I_{r,t} = \alpha_r T_t$	✓	✓	-	-	-	PAGE
Puissance 2	$I_{r,t} = \alpha_r T_t^2$	✓	✓	✓	-	-	DICE-95
Puissance 3	$I_{r,t} = \alpha_r T_t^3$	✓	✓	✓	-	-	CETA
Polynôme 2	$I_{r,t} = \alpha_r T_t + \beta_r T_t^2$	✓	✓	✓	✓	-	RICE-99, FUND
<i>Hockey stick</i>	$I_{r,t} = Y_{r,t} \left[\left(1 - \alpha_r \left(\frac{T_t}{T_r^{\text{cat}}} \right)^2 \right)^n - 1 \right]$	✓	✓	✓	-	✓	MERGE

avec I, Y, T, T^{cat} qui dénotent respectivement le niveau d'impact, le PIB, la variation de température, le seuil de catastrophe ; r, t , la région et la période de temps ; α, β, n , des paramètres.

pour une élévation donnée de la température. Les recommandations des modèles intégrés sont donc étroitement dépendantes des hypothèses sur l'exposant de la fonction (fonction quadratique, cubique, jusqu'à l'exposant 12 exploré par Nordhaus), qui va déterminer comment évoluent les impacts dès lors qu'on s'écarte du point d'étalonnage : augmenter l'exposant de la fonction – ce qui revient à accroître partout sa courbure – conduit à des impacts de plus en plus importants au-delà du point d'étalonnage et très faibles en deçà.

La littérature récente étant riche d'exemples faisant état d'impacts négligeables, voire bénéfiques pour un changement climatique de faible ampleur (Mendelsohn *et al.*, 2000 ; Smith et Hitz, 2002), les approches de seconde génération retiennent des formes polynomiales, qui permettent de représenter des impacts positifs pour de faibles variations de la température, puis négatifs à partir d'un certain seuil. Cependant, même si ces formes fonctionnelles permettent de considérer des impacts d'autant plus significatifs que la température croît, les trajectoires qu'elles supposent restent graduelles, ce qui exclut par nature toute catastrophe. Manne et Richels (1995) proposent à cet égard une forme fonctionnelle intéressante : la forme « *hockey stick* », qui permet de considérer un seuil de température à partir duquel les impacts deviennent exponentiels. Le principal problème est que ce seuil est fixé arbitrairement. Il est toutefois surprenant que si peu d'attention soit portée à cette forme fonctionnelle, dont l'avantage est de représenter l'occurrence d'un événement catastrophique, une caractéristique des risques climatiques qui fait l'objet d'une attention croissante (Howarth, 2003 ; Tol, 2003).

Parmi les sept facteurs répertoriés pour expliquer les trajectoires d'impacts, seuls les deux premiers sont retenus dans les fonctions d'impacts couramment employées : la sensibilité régionale (par le biais des paramètres d'échelle α, β) et le niveau de changement climatique (par le biais de la variable T). En d'autres termes, ces fonctions représentent des trajectoires de sensibilité

plutôt que de vulnérabilité au changement climatique. Rappelons que la sensibilité est le degré auquel les systèmes socioéconomiques sont affectés par les stimuli climatiques (nature, variabilité, fréquence et intensité d'événements extrêmes). La vulnérabilité, au contraire, est le degré auquel ces systèmes sont en mesure de faire face à ces effets adverses, compte tenu de leur résilience naturelle, renforcée par leurs capacités d'adaptation. Cette vulnérabilité est donc fonction de la sensibilité des régions et de leur degré d'adaptabilité, qui peut jusqu'à transformer une perte potentielle en un gain avéré. La question est de savoir dans quelle mesure et à quelle vitesse les économies s'adapteront, ce que les cinq derniers facteurs permettent globalement de décrire.

Le problème est que nous connaissons mal les relations entre ces facteurs et l'amplitude des impacts. En effet, s'il semble évident qu'une économie agricole sera plus vulnérable au changement climatique qu'une économie industrialisée, ou encore que l'adaptation à la variabilité du climat sera d'autant plus importante que l'économie en question sera développée, peu de choses peuvent être dites sur le rapport qui existe entre niveaux de développement et impacts, niveaux technologiques et impacts, anticipation du changement et impacts, etc. Cela est d'autant plus prononcé que ces rapports doivent être connus dans le présent mais aussi dans le futur. Il existe cependant des tentatives de traitement de l'adaptation, notamment via la prise en compte des deux dernières caractéristiques, le rythme et le timing du changement climatique. Tol (1999b) considère le rythme du changement climatique dans le secteur agricole (*i.e.* ce secteur est le plus vulnérable au rythme de changement). Pour ce faire, il ajoute, à la fonction de réponse agricole du niveau de changement climatique, une fonction représentant les impacts du rythme de ce changement. Cette fonction de rythme est de la forme :

$$a_{r,t}^{ry} = \alpha \left[\frac{\Delta T_t}{0,04} \right]^\beta + \rho a_{r,t-1}^{ry}$$

avec $a^{\rho y}$, la variation de la production agricole due au rythme du changement, ΔT , la variation de la température, ρ , la vitesse d'adaptation, r , la région, t , la période, α et β , des paramètres. Tol considère, par conséquent, que si la variation annuelle de température est supérieure à $0,04$ °C, soit une variation de 1 °C tous les 25 ans, cela est d'autant plus dommageable pour l'agriculture (il considère $1,5 \leq \beta \leq 2,5$). Cette tendance est cependant limitée par une vitesse d'adaptation fixée arbitrairement ($5 \leq \rho \leq 15$).

La prise en compte du timing du changement permet aussi de tenir compte d'un certain niveau d'adaptation. Nordhaus et Boyer (1999), comme Tol (1999b), considèrent que plus le PIB régional de la période est important par rapport au PIB régional de l'année de référence du modèle, plus la vulnérabilité de la région est faible. Cela permet de considérer que plus une économie est développée, plus elle est adaptable. Mathématiquement, cela revient à multiplier la fonction de réponse par $[Y_{r,t}/Y_{r,ref}]^{\varepsilon}$, où Y est le PIB, r , la région, t , la période et ε , une élasticité $0 \leq \varepsilon \leq 1$. Cette élasticité est malheureusement fixée de manière ad hoc.

Que ce soit à travers la représentation du rythme ou du timing de changement climatique, l'adaptabilité est en définitive considérée de manière arbitraire. Pour estimer les paramètres ρ et ε , on est renvoyé à des dires d'experts difficilement contrôlables, s'appuyant sur des tendances passées et des hypothèses concernant les relations entre PIB, répartition des richesses, progrès technique et adaptabilité. En outre, la représentation qui en est donnée est très simplifiée par rapport aux phénomènes à l'œuvre. En particulier, les anticipations des agents face au risque ne sont pas abordées : compte tenu de la variabilité du climat, peut-on détecter le signal du changement climatique ? Compte tenu des incertitudes sur son évolution à long terme, peut-on l'interpréter pour décider des stratégies d'adaptation appropriées ? Comment les inerties sociales et techniques retardent-elles la décision ?

Pour clore cette section consacrée aux incertitudes liées à la formulation de fonctions de réponse, une dernière série de limites concerne leur étalonnage. En effet, si les approches de première génération (fonctions puissance et *hockey stick*) sont facilement étalonnées sur la base d'un unique point discret (étant donné que la variable temps est ignorée), le choix d'une forme polynomiale d'ordre 2 nécessite deux points (toujours en ignorant la variable temps). Or on l'a vu dans la section précédente, nous ne disposons que d'un unique triplet discret (ΔT , temps, impact). Pour résoudre ce problème, Nordhaus et Tol apportent deux solutions distinctes. L'approche de Nordhaus est la plus contestable des deux. Il évalue les paramètres des fonctions polynomiales sectorielles en deux étapes. Dans une première étape, il estime sur la base de données actuelles les impacts sectoriels des différentes régions considérées (e.g. les dépenses de santé

actuelles aux États-Unis, en Europe, en Europe de l'Est, etc.). À chacune de ces régions correspond une température moyenne actuelle souvent distincte. En effectuant une pondération par les populations, il déduit une relation liant température et impact sectoriel. Dans une seconde étape, cette relation est ajustée sur le point discret évalué, ce qui lui permet d'étalonner chacune des fonctions polynomiales sectorielles. Tol, pour sa part, résout ce problème en postulant que seul le secteur agricole peut bénéficier du réchauffement. Il considère de fait que la fonction de réponse agricole est une fonction polynomiale d'ordre 2, alors que toutes les autres fonctions de réponse sectorielles sont considérées polynomiales d'ordre 1. Le problème se pose donc uniquement pour le secteur agricole. Il est facilement résolu puisque ce secteur est aussi le seul pour lequel on connaît les températures permettant une productivité optimale. Par exemple, les études de Darwin *et al.* (1995), Reilly *et al.* (1994) ou Rosenzweig et Parry (1994) fournissent cette température optimale. Elle correspond au sommet de la parabole et fournit par conséquent le second point d'étalonnage.

Conclusion

Les connaissances actuelles sur l'évaluation et la représentation formelle des impacts du changement climatique restent extrêmement modestes. Il s'ensuit de fortes incertitudes sur les résultats des approches modélisées reposant sur l'évaluation de ces coûts économiques et sociaux.

Il ressort de notre contribution quatre sources d'incertitudes liées à la représentation des impacts : la rareté des évaluations (aucune information n'est disponible pour des réchauffements importants et à long terme, avec la question des catastrophes climatiques ou du déclenchement de crises graves dans les régions en développement); leur incomplétude (avec de très importantes inconnues concernant la situation des pays en développement); leur niveau d'agrégation géographique (avec un effet de masque dissimulant de grandes hétérogénéités, dont de potentielles ruptures très localisées aux conséquences socioéconomiques lourdes); et les difficultés de la valorisation monétaire. L'extrapolation des fonctions de réponse repose dès lors sur des hypothèses générales concernant leur forme et amplitude. De manière récurrente, la littérature postule des formes fonctionnelles simples, du type puissance ou polynomiale d'ordre 2, qui écartent l'éventualité de non-linéarités. Pourtant, hormis les questions de faisabilité technique, rien ne semble justifier leur utilisation.

Nous sommes donc amenés à nous demander dans quelle mesure nous représentons correctement les risques climatiques dans les modèles intégrés au moyen des fonctions de réponse. Nos connaissances sur les

impacts potentiels du changement climatique sont, en effet, encore trop parcellaires et très fragiles pour obtenir une représentation dynamique des risques, sous la forme d'une trajectoire liant température, impact monétaire et temps. Ces limites se répercutent sur les choix des modélisateurs et la qualité des fonctions de réponse que nous sommes en mesure d'écrire en pâtit bien évidemment. Sur ce point, le troisième rapport du GIEC conclut d'ailleurs : « *Aggregate damage functions used in integrated assessments are mostly illustrative. They should be regarded as "placeholders" that will be replaced by more accurate functional forms as our knowledge of impacts dynamics improves* » (McCarthy *et al.*, 2001, Chap. XIX, § 19.5.4.1).

Faute de mieux, donc, en attendant ces inaccessibles fonctions, nous bâtissons les modèles intégrés au moyen de fonctions relativement simples, ayant le mérite de satisfaire des exigences analytiques et numériques et de ne pas trahir le peu que nous sachions sur les impacts. Ces simplifications ne sont pas critiquables en soi, mais il est important de les avoir à l'esprit quand la majorité des modèles intégrés concluent à un effort modeste de réduction des émissions, au moins pendant les premières décennies, ou, comme le modèle RICE, que le coût global du protocole de Kyoto serait de 716 milliards US\$, que les États-Unis à eux seuls en supporteraient les deux tiers, et que ces coûts seraient 8 fois moins importants en reportant l'action et en effectuant une majorité des réductions dans les pays en développement (Nordhaus et Boyer, 1999). Avant de tirer des conclusions définitives pour la décision publique, il est important de comprendre, d'une part, que certaines caractéristiques des risques climatiques ne sont pas convenablement représentées dans ces modèles et, d'autre part, que les spécifications retenues par les modélisateurs peuvent dans une large mesure en orienter les résultats.

Rappelons pour finir qu'il ne s'agit pas de condamner l'utilité de l'évaluation intégrée en matière de gestion des problèmes globaux. Ces modèles présentent, en effet, une forte valeur informative sur un terrain heuristique (mise en cohérence de visions du futur, hiérarchisation des incertitudes, etc.). Il convient cependant de les utiliser en ayant conscience des incertitudes qui les caractérisent et de formuler des recommandations d'ordre analytique plutôt que prescriptif.

Références

- Bruce, J.P., Lee, H., Haites, E.F. (Eds), 1996. *Climate Change 1995: Economic and social dimensions of climate change. Contribution of Working Group III to the Second Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, Cambridge (UK & US), Cambridge University Press.
- Darwin, R., Tsigas, M., Lewandrowski, J., Ranases, A., 1995. *World Agriculture and Climate Change: Economic Adaptations*. AER-703, US Department of Agriculture, Washington DC.
- Deneux, M., 2002. *L'Évaluation de l'ampleur des changements climatiques, de leurs causes et de leur impact prévisible sur la géographie de la France à l'horizon 2025, 2050 et 2100*. Rapport n° 3603 (Ass. nationale), n° 224 (Sénat), Paris, Office parlementaire d'évaluation des choix scientifiques et technologiques (Assemblée nationale, Sénat).
- Fankhauser, S., 1995. *Valuing climate change: the Economics of the Greenhouse*, London (UK), Earthscan.
- Hope, C., Anderson, J., Wenman, P., 1993. Policy Analysis of the Greenhouse Effect: An Application of the PAGE Model, *Energy Policy*, 21, 3, 327-338.
- Howarth, R.B., 2003. Catastrophic outcomes in the economics of climate change: an editorial comment, *Climatic Change*, 56, 257-263.
- Manne, A.S., Richels, R., 1995. The Greenhouse Debate: Economic Efficiency, Burden Sharing and Hedging Strategies, *Energy Journal*, 16, 4, 1-37.
- 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 (UK & US), Cambridge University Press.
- Mendelsohn, R., 2000. *Letter to Senator McCain*, United States Senate Archives (<http://senate.gov/~commerce/hearings/0718men.pdf>).
- Mendelsohn, R., Morrison, W., Schlesinger, M.E., Andronova, N.G., 1997. *Country-Specific Market Impacts of Climate Change*. N.G., 2000. Country-Specific Market Impacts of Climate Change, *Climatic Change*, 45, 553-569.
- Mendelsohn, R., Neumann, J.E. (Eds), 1999. *The Impact of Climate Change on the United States Economy*, Cambridge (MA, USA), Cambridge University Press.
- Nordhaus, W., 1994a. Expert opinion on climatic change, *American Scientist*, 82, 45-52.
- Nordhaus, W., 1994b. *Managing the Global Commons: the Economics of Climate Change*, Cambridge (MA, USA), MIT Press.
- Nordhaus, W., Boyer, J.G., 1999. *Warming the world: Economics models of Climate Change*, Cambridge (MA, USA), MIT Press.
- Parry, M.L. (Ed.), 2000. *Assessment of potential effects and adaptations for climate change in Europe: the Europe ACACIA project*, Norwich (UK), Jackson Environment Institute, University of East Anglia.
- Pearce, D.W., 1993. *Economic Values and the Natural World*, London (UK), Earthscan.
- Peck, S.C., Teisberg, J.T., 1992. CETA: a model for Carbon Emissions Trajectory Assessment, *The Energy Journal*, 13, 55-77.
- Peck, S.C., Teisberg, T., 1993. *The importance of nonlinearities in global warming damage costs*, Washington DC, RFF.
- Plambeck, E.L., Hope, C., Anderson, J., 1997. The PAGE95 model : integrating the science and economics of global warming, *Energy Economics*, 19, 77-101.
- Reilly, J.M., Hohmann, N., Kane, S., 1994. Climate change and agricultural trade: who benefits, who loses?, *Global Environmental Change*, 4, 1, 24-36.
- Rosenzweig, C., Parry, M., 1994. Potential impact of climate change on world food supply, *Nature*, 367, 133-138.
- Rotmans, J., Dowlatabadi, H., 1998. Integrated assessment of climate change: evaluation of methods and strategies, in Rayner, S., Malone, E. (Eds), *Human Choice and*

- Climate Change: An International Social Science Assessment*, Washington DC.
- Smith, J.B., Hitz, S., 2002. *Estimating global impacts from climate change: Background paper for the OECD/WPGSP project "Benefits of climate policy"*, Stratus Consulting Inc., Boulder (CO).
- Tol, R.S.J., 1997. On the Optimal Control of Carbon Dioxide Emissions: An Application of FUND, *Environmental Modelling and Assessment*, 2, 151-163.
- Tol, R.S.J., 1999a. *New estimates of the damage costs of climate change. Part I: Benchmark estimates*, Amsterdam, Vrije Universiteit Amsterdam.
- Tol, R.S.J., 1999b. *New estimates of the damage costs of climate change. Part II: Dynamic estimates*, Amsterdam, Vrije Universiteit Amsterdam.
- Tol, R.S.J., 2003. Is the uncertainty about climate change too large for expected cost-benefit analysis?, *Climatic Change*, 56, 265-289.
- Watson, R.T., Zinyowera, M.C., Moss, R.H., Dokken, D.J. (Eds), 1996. *Climate Change 1995 – Impacts, Adaptations and Mitigation of Climate Change: Contribution of Working Group II to the Second Assessment Report of the IPCC*, Cambridge (UK) & New York (NY, USA), Cambridge University Press.
- Weller, G., Lange, M., 1999. *Impacts of global change in the Arctic regions*, International arctic science committee, Centre for global change and arctic system research, University of Alaska, Fairbanks (AK).
- Weyant, J., Davidson, O., Dowlatabadi, H., Edmonds, J.A., Grubb, M., Parson, E.A., Richels, R., Rotmans, J., Shukla, P.R., Tol, R.S.J., Cline, W.R., Fankhauser, S., 1996. Integrated assessment of climate change: An overview and comparison of approaches and results, in Bruce, J. P., Lee, H., Haites, E.F. (Eds), *Climate Change 1995: Economic and social dimensions of climate change. Contribution of Working Group III to the Second Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, Cambridge (UK & US), Cambridge University Press.
- Yohe, G., Garvey, B., 1995. Incorporating Uncertainty and Non-linearity into the Calculus of an Efficient Response to the Threat of Global Warming, *International Journal of Global Energy Issues*, 7, 34-47.

Reçu le 23 décembre 2002. Accepté le 2 septembre 2004.