

LES IMPACTS ÉCONOMIQUES FUTURS DU CHANGEMENT CLIMATIQUE SONT-ILS SOUS-ESTIMÉS ?

[Stéphane Hallegatte](#), [Daniel Théry](#)

Daloz | « [Revue d'économie politique](#) »

2007/4 Vol. 117 | pages 507 à 522

ISSN 0373-2630

Article disponible en ligne à l'adresse :

<https://www.cairn.info/revue-d-economie-politique-2007-4-page-507.htm>

Distribution électronique Cairn.info pour Daloz.

© Daloz. Tous droits réservés pour tous pays.

La reproduction ou représentation de cet article, notamment par photocopie, n'est autorisée que dans les limites des conditions générales d'utilisation du site ou, le cas échéant, des conditions générales de la licence souscrite par votre établissement. Toute autre reproduction ou représentation, en tout ou partie, sous quelque forme et de quelque manière que ce soit, est interdite sauf accord préalable et écrit de l'éditeur, en dehors des cas prévus par la législation en vigueur en France. Il est précisé que son stockage dans une base de données est également interdit.

Les impacts économiques futurs du changement climatique sont-ils sous-estimés ?

Stéphane Hallegatte*
Daniel Théry**

Alors que les débats sur les politiques climatiques se concentrent sur la valeur du taux d'actualisation, on ne sait toujours pas ce que l'on doit actualiser. En effet, les coûts économiques potentiels (non-actualisés) du changement climatique sont largement inconnus et seules quelques études ont cherché à les estimer. La plupart d'entre elles ont abouti à des impacts économiques de l'ordre de quelques pourcents du Produit Intérieur Brut pour des réchauffements de quelques degrés. Ces études ont cependant négligé des mécanismes potentiellement importants, et ont souvent considéré un climat stabilisé. Cet article soutient que les impacts doivent être évalués en termes d'adaptation des systèmes économiques à un climat en évolution rapide. Pour cela, il est important de tenir compte : (1) de l'interaction entre l'incertitude sur le climat futur et l'inertie de certains secteurs économiques ; (2) des contraintes économiques de court terme, qui sont centrales dans la réponse de l'économie à des chocs, climatiques ou autres. Finalement, les impacts du changement climatique ne peuvent être estimés en supposant que les sociétés seront parfaitement capables de gérer les nouveaux risques créés par le changement climatique, de nombreuses expériences passées en montrant la difficulté. Les mécanismes évoqués ici suggèrent que l'incertitude sur les dommages du changement climatique est encore plus importante que ce qui est communément admis. Alors que les débats sur le changement climatique n'ont jamais été aussi actifs, il est donc urgent d'accroître nos efforts de recherche sur ce thème.

changement climatique - impact économique - incertitude - infrastructure - catastrophe naturelle

Are the economic impacts of climate change underestimated?

While the economic debate on climate policy focuses on discounting, we do not know yet what to discount. The potential (non-discounted) socio-economic cost of climate change, indeed, is still unknown. Only a few studies have tried to estimate socio-economic costs of climate change. Most of them concluded that, for a warming of a few

* Centre International de Recherche sur l'Environnement et le Développement (Paris, France) et École Nationale de la Météorologie (Météo-France, Toulouse, France)
hallegatte@centre-cired.fr

** Centre International de Recherche sur l'Environnement et le Développement (Paris, France).

degrees, damages will be limited to a few percent of GDP. All these studies, however, have disregarded important mechanisms and have only considered the cost of a stabilized new climate. This article claims that the climate change issue should instead be framed in terms of the adaptation of socio-economic systems to a changing climate. Doing so, it calls for the taking into account of (1) the interaction between the uncertainty on future climate and the inertia of important economic sectors; (2) the short-term economic constraints that will be key in the response to climate shocks. Finally, the impacts of climate change cannot be estimated assuming that societies will always be able to manage in a perfect way the subsequent change in risks, as past experiences demonstrate our poor ability to do so. These mechanisms suggest that the uncertainty on future climate change damages is even larger than it is usually acknowledged, and calls for additional research on climate change impacts.

climate change - economic impact - uncertainty - infrastructure - natural disaster

Classification JEL : O10, Q50, Q54

La publication du rapport Stern [2006] a nourri des débats houleux, surtout concernant l'évaluation du coût économique d'un changement climatique non maîtrisé. Le schéma d'actualisation, en particulier, a attiré de nombreuses critiques, ainsi que des réponses des auteurs (par exemple, Nordhaus [2006b] ; Yohe [2006] ; Tol and Yohe [2006] ; Dietz *et al.* [2007]). Il est possible, toutefois, que le taux d'actualisation ne soit pas le paramètre le plus essentiel pour la définition des politiques climatiques. Il semble en effet que le niveau, ainsi que la distribution spatiale et temporelle des impacts, soient bien plus importants (Ambrosi *et al.* [2003]). Néanmoins, bien peu d'études ont été publiées sur l'évaluation des impacts économiques du changement climatique (Nordhaus and Boyer [2000] ; Nordhaus [2006a] ; Tol [2002a,b] ; Mendelsohn *et al.* [2000, 2004] ; Stern *et al.* [2006]). Plus frappant encore, ces études sont toutes fondées sur un ensemble restreint d'études sectorielles, et leurs auteurs sont les premiers à reconnaître les limites de ces évaluations et à leur attribuer un faible niveau de confiance. Ils admettent donc le besoin d'améliorer les méthodologies utilisées par ces études, qui sont aujourd'hui fondées sur des relations statistiques entre les conditions climatiques et les performances économiques, calibrées sur la situation actuelle (par exemple, Nordhaus [2006a] ; Mendelsohn *et al.* [2004]) ou sur des modèles simples des processus mis en jeu (par exemple, Tol [2002a]).

À partir de là, la plupart des évaluations ont conclu que les dommages du changement climatique seront limités autour de quelques pourcents de la production mondiale pour quelques degrés d'augmentation de la température. Le Rapport Stern, de ce point de vue, peut passer pour particulièrement pessimiste. Ce pessimisme, toutefois, provient uniquement d'une différence d'approche, puisque le Rapport Stern prédit des dommages comparables à ceux de Nordhaus pour un même niveau de réchauffement. Mais, au lieu de considérer un seul niveau de réchauffement possible, le Rapport Stern utilise une approche de « gestion des risques », en se donnant une distribution de probabilité des différents réchauffements possibles, y compris les scénar-

rios les plus extrêmes en termes de sensibilité du climat et de surprise climatique. Il n'est pas surprenant que la prise en compte de scénarios particulièrement pessimistes augmente l'espérance de la valeur des dommages climatiques. De plus, le Rapport Stern considère un horizon temporel plus long que les études précédentes (jusqu'à 2200) et utilise un taux d'actualisation particulièrement faible, ce qui explique aussi pourquoi son évaluation de la valeur nette présente des dommages climatiques est très élevée.

De Nordhaus à Stern, toutes ces études ont été très innovantes, et elles ont eu une large influence sur la communauté scientifique, malgré leurs limitations. C'est pourquoi il est aussi important de noter que les méthodes sur lesquelles elles s'appuient sont discutables. Ainsi, elles sont fondées sur des hypothèses fortes concernant le fonctionnement de l'économie, par exemple sur les anticipations et les mécanismes de l'adaptation, et elles se concentrent sur un petit nombre de secteurs économiques jugés particulièrement vulnérables aux conditions climatiques (agriculture, énergie, etc.). Plus important encore, ces études évaluent le plus souvent l'impact d'un nouveau climat *stabilisé*, alors que le climat sera loin d'être équilibré pendant plusieurs siècles. Ainsi, de nombreux mécanismes supplémentaires devraient être pris en compte pour que l'on puisse faire confiance aux évaluations. Or, les auteurs du Rapport Stern (Dietz *et al.* [2007]) ne remettent pas en question les études sectorielles qui sont au cœur de leur évaluation, alors même que ces études négligent de nombreux mécanismes décrits dans les excellents chapitres 3 à 5 de leur Rapport.

Certains de ces « mécanismes manquants » ont déjà été décrits en détail dans la littérature, voir par exemple Smith *et al.* [2001], Watkiss *et al.* [2005], ou Stern *et al.* [2006]. Le présent article veut toutefois insister sur d'autres processus, qui ont reçu moins d'attention jusqu'à présent. Avant tout, il faut rappeler que les dommages du changement climatique devraient être évalués dans un cadre dynamique, puisque le climat sera en constante évolution dans le futur et que presque tous les systèmes économiques auront à connaître une ère de transition hors de la situation présente, dans laquelle ils sont adaptés à un climat stable¹, vers une nouvelle situation, dans laquelle le climat sera en évolution. Et dans un tel cadre, deux processus sont particulièrement importants : (1) l'interaction entre l'incertitude sur le climat futur et l'inertie de plusieurs secteurs économiques, en particulier les infrastructures ; (2) le rôle des chocs et des contraintes de court terme dans la détermination des conséquences de long terme. Ces processus pourraient être la cause de dommages importants dans le futur, et leur prise en compte pourrait changer de façon considérable les résultats des analyses coût-bénéfice sur les politiques climatiques.

1. Bien entendu, cette stabilité de long terme du climat n'empêche pas l'existence de fluctuations sur des échelles de temps plus ou moins longues (p. ex., optimum climatique médiéval du XIV^e siècle, petit âge glaciaire vers le XVII^e siècle, etc.), qui ont pu avoir des conséquences économiques et sociales importantes.

1. Incertitudes et inerties dans un climat en évolution

De nombreux articles traitent de l'interaction entre l'incertitude sur le changement climatique futur et l'inertie des infrastructures, mais uniquement dans l'analyse des stratégies de réduction des émissions de gaz à effet de serre (Ambrosi [2003] ; Yohe *et al.* [2004]). Du côté de l'évaluation des dommages et de l'adaptation, ce problème important a été quasiment oublié.

Il y a pourtant un large consensus pour dire que l'essentiel des impacts socio-économiques du changement climatique viendra des effets de la transition climatique. En effet, il n'y a guère de raison pour favoriser le climat actuel plus qu'un autre, au moins dans la gamme des climats actuellement prédits par les modèles climatiques. Sur le long terme, l'humanité est sans doute capable d'adapter son style de vie et ses systèmes socio-économiques à un climat plus chaud en moyenne de quelques degrés. Aussi, on peut admettre que si le climat reste assez stable sur une longue période, les systèmes socio-économiques pourront s'y adapter. Ceci est aussi vrai pour le climat plus chaud auquel on doit s'attendre dans les siècles prochains, en l'absence de « surprise climatique² » (par exemple une sensibilité du climat supérieure à 5 °C).

Mais, même dans les scénarios optimistes, on peut être légitimement inquiet pour les siècles à venir, pendant lesquels les systèmes économiques auront à faire face à un climat qui change à un rythme soutenu³. La question n'est donc pas de savoir si le « climat futur » est meilleur ou pire que celui de notre présent – il n'y a sans doute pas de réponse à cette question – mais de savoir comment et à quel coût nous pouvons adapter nos modes de vie et notre système économique à un climat « sans cesse changeant ».

Pour ce faire, nous devons prendre en compte le fait que les échelles de temps de plusieurs secteurs économiques lourds (logement et urbanisme, production d'énergie, gestion des inondations...) sont si longues que les caractéristiques de ces secteurs en 2100 dépendent largement des décisions qui seront prises dans les quelques décennies à venir. Les investissements faits à l'heure actuelle dans ces secteurs devraient donc, dans l'idéal, être

2. Il est toutefois important de souligner ici la possibilité de scénarios pessimistes, que notre connaissance du système climatique ne permet pas d'écarter, et qui auraient des conséquences d'un autre ordre de grandeur que celles évoquées ici. Compte tenu du risque qu'ils représentent, il est absolument essentiel que ces scénarios soient pris en compte dans l'analyse et l'évaluation des politiques climatiques. Cet article ne va cependant pas s'intéresser à ces scénarios, pour se concentrer sur les conséquences d'un réchauffement modéré, tel que ceux prédits par les modèles climatiques, afin de montrer que, même en l'absence de surprise climatique, les impacts du changement climatique pourraient ne pas être négligeables.

3. On rencontre le même problème pour les écosystèmes : même si la migration des espèces permettrait théoriquement aux écosystèmes de faire face au changement climatique, leur capacité à migrer assez vite est loin d'être assurée, créant le risque d'extinctions massives (voir par exemple, Thomas *et al.* [2004]).

conçus en tenant compte de comment le climat va changer tout au long de ce siècle. Malheureusement, l'incertitude sur le changement climatique est encore très grande. Et on doit garder à l'esprit (i) que l'incertitude à l'échelle locale, celle pertinente pour mettre en œuvre des stratégies d'adaptation, est au moins un ordre de grandeur plus importante que celle à l'échelle globale ; et (ii) que les évolutions des climats locaux sont masquées par la variabilité naturelle, ce qui rend leur détection particulièrement difficile.

1.1. Études de cas

Pour illustrer ce problème, prenons l'exemple du parc immobilier, dont le temps de rotation tourne en France autour de 150 ans. Les bâtiments que l'on construit dans les années 2000 devraient donc être conçus en fonction des conditions climatiques locales entre aujourd'hui et 2150, alors que ces dernières sont encore largement inconnues (voir par exemple, Hallegatte *et al.* [2007a]). Ainsi, selon le modèle de Météo-France (Arpège-Climat), et en supposant un scénario d'émission SRES/A2, le climat de Paris en 2080 sera proche du climat actuel de Bordeaux, alors que selon le modèle du Hadley Centre (HadRM3H), il sera plutôt proche du climat actuel de Cordoue, au sud de l'Espagne. Quant à Londres, ces modèles prévoient respectivement le climat actuel de Nantes ou de Porto. En comparant Bordeaux et Cordoue d'une part, ou Nantes et Porto d'autre part, on comprend bien que, en fonction du modèle climatique auquel on fait confiance, les normes de construction optimales qu'il faudrait mettre en place dès aujourd'hui sont complètement différentes (Roaf *et al.* [2005]). Ce problème s'aggrave encore si l'on tient compte de l'incertitude sur l'évolution des émissions de gaz à effet de serre, qui élargit de manière importante le spectre des climats futurs possibles.

Si nous connaissions précisément, et dès aujourd'hui, les caractéristiques du climat futur, les dommages liés à l'inadaptation du parc construit seraient limités, parce qu'un processus lent et peu coûteux d'adaptation pourrait commencer dès maintenant. En effet, améliorer les normes de construction des nouveaux bâtiments pour les rendre moins vulnérables aux vagues de chaleur n'augmenterait que légèrement les coûts de construction (probablement de moins de 10 %⁴). Comme les nouvelles constructions représentent environ 2 % du PIB dans la plupart des pays développés, cette amélioration coûterait moins de 0,2 % de PIB. Les économies d'énergie que permettrait cette mesure, en outre, compenseraient largement ce coût, car il est bien accepté maintenant que de nombreuses stratégies de réduction de la consommation énergétique des bâtiments sont « sans-regret », c'est-à-dire à coût négatifs. Les réductions d'émission de gaz à effet de serre correspondantes représenteraient en outre un important bénéfice collatéral de cette mesure.

4. Il est intéressant de noter que la différence de coût de construction entre les bâtiments de haute et de basse qualité n'est que de 50 % en France. C'est donc principalement leur taille et leur localisation qui déterminent le prix des logements.

Mais l'incertitude complique la prise de décision, et risque de rendre inévitables des mesures de correction coûteuses, décidées dans l'urgence. La vague de chaleur⁵ de 2003 a montré que beaucoup de logements en France auraient besoin d'être rénovés thermiquement pour être vivables dans un monde futur où plus d'un été sur deux serait plus chaud que celui de 2003. Une telle rénovation coûterait autour de 300 milliards d'euros, c'est-à-dire 25 % du PIB français. Si elle devait être faite dans l'urgence en réponse à une crise créée par une série de canicules, son coût annuel pourrait dépasser 1 % du PIB français, sans même prendre en compte l'augmentation de prix qu'engendrerait la pénurie de matériaux et de travailleurs qualifiés dans le secteur de la construction⁶. Ce problème n'a pas été comptabilisé dans les évaluations publiées des dommages du changement climatique, malgré l'importance du logement à la fois pour le style de vie et comme composante majeure du patrimoine des ménages.

Un autre exemple des conséquences de l'incertitude est fourni par la protection de la Nouvelle Orléans face au risque cyclonique. Les infrastructures de protection de la ville sont en effet en cours de conception, et elles vont influencer son développement pour plus d'un siècle. Dans l'idéal, de telles infrastructures devraient être conçues en fonction d'une analyse rigoureuse du risque cyclonique sur le long terme. Mais le changement climatique complique la situation : quelle sera la probabilité qu'un cyclone de catégorie 5 (sur l'échelle de Saffir-Simpson qui compte 5 niveaux) frappe la ville vers 2080 ? Pour l'heure, personne ne peut répondre à cette question, comme le montre le débat actuel dans la communauté scientifique (Emanuel [2005, 2006] ; Landsea [2006] ; Trenberth [2005] ; Webster *et al.* [2005]). Cette incertitude rend très difficile la conception de ce système de protection (voir Hallegatte [2006]). Or, vu le prix d'une telle protection – jusqu'à 30 milliards de dollars selon certaines études – et le risque financier et humain en cas de cyclone – jusqu'à 200 milliards de dollars de dommages et des milliers de vie en jeu –, les pertes associées à une protection inadéquate peuvent rapidement devenir importantes. Et ce problème ne touche pas seulement la Nouvelle Orléans, car la même situation se présente dans toutes les villes côtières sujettes aux cyclones tropicaux ou aux tempêtes extra-tropicales. En outre, la gestion catastrophique du risque cyclonique à la Nouvelle Orléans montre qu'il ne suffit pas que tous les paramètres soient bien connus pour que les décisions rationnelles soient prises. Avec des paramètres bien plus incertains qu'hier, une mauvaise adaptation aux risques futurs est malheureusement le scénario le plus probable.

5. Cette vague de chaleur, qui correspond à un été moyen en 2080 dans un scénario d'émission SRES/A2 d'après les modèles climatiques, a causé plus de 30 000 morts et 15 milliards de dollars de pertes économiques en Europe.

6. Des catastrophes naturelles récentes ont montré comment le prix de la reconstruction pouvait augmenter à la suite des pénuries de matériaux et de travailleurs qualifiés. Ainsi, les coûts de reconstruction ont augmenté de près de 40 % en Floride suite aux quatre cyclones de la saison 2004.

1.2. Anticipation et adaptation

Le couple incertitude-inertie rend donc très improbable une adaptation parfaitement anticipée. Même si une stratégie anticipatrice semble rationnelle et robuste aux incertitudes, par exemple améliorer des normes de construction dans le bâtiment, le risque de coûts immobilisés à court terme pour faire face à des bénéfices incertains et lointains, rend politiquement difficile leur pleine mise en œuvre. Ainsi, confronté à la pénurie structurelle de logements en France, aucun gouvernement n'a souhaité mettre en œuvre des mesures qui renchérisse – même de manière limitée – les coûts de construction, surtout s'il s'agit de réduire des dommages climatiques dans 50 ans. Par conséquent, une partie du stock du patrimoine bâti a toutes les chances de se trouver inadaptée à la fin du siècle. Il pourrait en découler une perte d'attractivité de certaines villes⁷, qui pourrait avoir de fortes conséquences dans un monde où les grandes métropoles sont en compétition pour attirer les entreprises et les touristes.

Ce problème est amplifié par le fait que les fortes incertitudes rendent très volatiles les anticipations, qui sont souvent révisées à l'occasion de crises, éventuellement accompagnées de « sur-réactions ». Dans un autre domaine où les incertitudes sont importantes, on a vu en 2006 comment quelques oiseaux malades ont mis à mal tout un secteur économique (50 000 emplois en France dans l'élevage de volaille), parce qu'ils ont fait croire à une importante épidémie de grippe aviaire. De la même manière, une série de vagues de chaleur pourrait facilement créer l'impression qu'une large fraction du parc immobilier va devenir inhabitable (ou au moins inconfortable) à cause du changement climatique. Que cela soit vrai ou faux, ce type de basculement des anticipations peut faire chuter le prix des logements, avec des répercussions sur le système économique, à travers la consommation et l'accès au crédit. De la même façon, la variabilité naturelle de l'activité cyclonique fait qu'on ne peut savoir si l'augmentation récente d'activité observée dans l'Atlantique Nord est liée au changement climatique – auquel cas elle va aller en s'amplifiant et on doit s'y adapter – ou liée à des cycles multi-décennaux – auquel cas elle est temporaire et ne demande pas de modification importante en terme de gestion du risque. Un basculement de l'opinion majoritaire sur ce sujet peut avoir des conséquences importantes, sur les prix de l'immobilier⁸ ou sur l'activité économique⁹.

7. Là encore, ce problème est tout à fait général. Quelle serait l'attractivité de la Californie du Sud si la température y atteint 45 °C tous les étés, avec une eau chère et rationnée ? Et comment l'ensemble de la Californie et les états voisins s'adapteraient-ils à une perte d'attractivité de cette région ?

8. On sait que la perception du risque cyclonique a une influence sur les prix de l'immobilier : en 1992, suite au passage du cyclone Andrew, on a observé une baisse de 18 % des prix dans la zone proche mais non touchée par le cyclone (Hallstrom and Smith [2005]). Cette baisse s'explique par la prise de conscience du risque cyclonique dans une région qui avait été épargnée pendant une longue période.

9. Il est remarquable que le tourisme en Floride a beaucoup souffert de la saison 2004, où de nombreux touristes ont dû être évacués, et que la Floride semble avoir perdu sa place de

On peut estimer que les infrastructures et le logement représentent environ 300 % du PIB français¹⁰. Si un climat en évolution nous force à remplacer seulement 1 % de ce stock chaque année, cela correspond à une diminution de 3 % du PIB annuel. Cette valeur est déjà supérieure aux conséquences de la baisse de productivité estimée par certaines évaluations de la littérature (Tol [2002a,b] ; Nordhaus [2006a]). Ceci suggère que l'évaluation de l'impact du changement climatique sur le stock d'infrastructure pourrait être plus importante que l'évaluation des conséquences de diminutions de productivité, sur lesquelles se sont pourtant concentrées les études précédentes.

2. Chocs et contraintes de court terme : le cas des catastrophes naturelles

Pour étudier les conséquences du changement climatique, il est particulièrement fécond de s'intéresser aux événements extrêmes, pour au moins deux raisons. D'abord, il est probable que le changement climatique n'apparaîtra pas comme un changement continu et régulier des conditions climatiques moyennes. En raison de la variabilité naturelle, c'est-à-dire la différence entre la météo et le climat, il est vraisemblable que le changement climatique nous affectera principalement, au moins pendant les prochaines décennies, par des changements dans la fréquence et l'intensité des événements extrêmes. Il est donc crucial d'examiner leurs conséquences, qu'on est surpris de voir si mal connues. De plus, les études sur les catastrophes naturelles passées fournissent des données réelles. Les modèles utilisés pour prédire le coût futur des catastrophes peuvent donc être validés sur ces données, ce qui rend leurs résultats bien moins incertains que les évaluations des autres impacts du changement climatique.

Travailler sur les conséquences des catastrophes conduit cependant à plusieurs difficultés spécifiques. Dans les modèles économiques d'équilibre, qui

principale destination des retraités américains, en partie à cause de la conscience du risque cyclonique (Adams et Shell [2004]).

10. En France, les investissements représentent environ 25 % du PIB. Les investissements dans les infrastructures et le logement représentent environ la moitié de l'investissement total (Louvot [1996]). La durée de vie des investissements dans les infrastructures et le logement est d'environ 55 ans (100 ans pour les bâtiments, 30 ans pour les routes, 60 ans pour les centrales électriques, etc.). En supposant que le stock de capital augmente de 2 % par an, on a : $(0,25/2) * PIB - K_{\text{infra}} / 55 = K_{\text{infra}} * 0,02$. Le capital d'infrastructure et logement est donc environ égal à 3,3 fois le PIB. En utilisant une autre méthode, on peut ajouter les valeurs des stocks d'infrastructure de transport (plusieurs centaines de milliards d'euros), d'énergie (environ 400 milliards), de gestion de l'eau (200 milliards), de protection contre les inondations (quelques dizaines de milliards) et de logement (environ 2 500 milliards). Le total de cette liste très incomplète est déjà largement au-delà de 3 000 milliards d'euros, soit deux fois le PIB français.

par construction ne peuvent pas représenter les courtes échelles de temps, les évènements extrêmes ne peuvent être pris en compte qu'à travers un abaissement dans la productivité *moyenne*. Mais, économiquement, l'effet principal des catastrophes est une destruction du capital productif et du patrimoine bâti, qui ne peut être décrite avec des modèles d'équilibre. Modéliser les catastrophes par des réductions de productivité ou par des destructions de capital ne serait équivalent que si on pouvait moyenner les impacts des catastrophes sur de longues périodes de temps. Or, ceci est rendu impossible par les non-linéarités dans le système économique¹¹.

Laisser de côté les non-linéarités revient à négliger l'essentiel du problème. Pour fixer les idées, notons que les 100 milliards de dollars de dommages dus au cyclone Katrina en Louisiane en 2005 représentent moins de deux semaines d'investissement aux États-Unis. Un modèle d'évaluation intégrée représenterait donc un tel désastre comme une bénigne perte d'investissement de deux semaines, à cause de l'effet d'éviction des dépenses de reconstruction sur l'investissement productif. Par conséquent, un changement climatique dont l'impact équivaldrait à la répétition chaque année aux États-Unis d'un désastre de l'ampleur de Katrina serait considéré comme acceptable par la méthodologie utilisée dans la littérature sur l'évaluation des dommages. Pourtant, le bon sens suggère le contraire, et cette contradiction montre l'importance de l'analyse des effets de court terme, des impacts indirects, et des conséquences sociales et redistributives des catastrophes.

2.1. Modéliser les catastrophes naturelles

Pour prendre en compte d'une façon plus acceptable les catastrophes, elles doivent être modélisées une par une, par des destructions du capital productif, et en utilisant des modèles économiques capables de reproduire les effets de court terme et de déséquilibre. Dans un tel cadre, cependant, Hallegatte *et al.* [2007b] montrent que deux écueils doivent être contournés. D'abord si on utilise une fonction de production conventionnelle avec des rendements décroissants, alors la destruction de x pourcent du capital productif par un désastre réduit de bien moins que x pourcent la production, exactement comme si l'on avait décidé d'investir x pourcent en moins. On se trouve donc dans une situation où il est équivalent de décider d'investir moins, ou de subir une catastrophe qui détruit une part du capital. Pourtant, il y a une grande différence entre décider d'investir moins en choisissant de ne pas réaliser les projets les moins profitables, et voir une catastrophe détruire une partie non choisie du capital. En conséquence, et contrairement à des investissements ou désinvestissements normaux, les dommages des

11. Ces non-linéarités font que les conséquences d'une catastrophe donnée sont plus négatives que la somme des conséquences de deux catastrophes deux fois moins destructrices (sur ce point, voir par exemple RMS [2005]).

catastrophes nécessitent d'appliquer des rendements constants, et donc d'introduire une fonction de production spécifique. Ce problème met en garde contre un usage routinier de modèles qui n'ont pas été spécifiquement développés pour représenter les impacts environnementaux.

Deuxièmement, il est nécessaire d'introduire des contraintes de court terme dans le rythme de la reconstruction pour reproduire la réponse observée à des catastrophes passées. Si on néglige ces contraintes, même les dégâts des plus grandes catastrophes seraient réparés en quelques mois, ce qui est contredit par les cas réels observés (p. ex : les tempêtes de l'hiver 1999 en Europe ; les inondations de 2002 en Europe centrale ; la saison cyclonique de 2004 en Floride). Parmi ces contraintes, il y a d'abord des contraintes financières, spécialement mais pas seulement dans les pays pauvres (voir Freeman *et al.* [2002] ; Mechler *et al.* [2006]), et des contraintes techniques, comme le manque de travailleurs qualifiés et d'équipements de construction. Il existe un grand nombre d'exemples empiriques de l'existence de ces contraintes, qui sont aussi responsables de l'inflation du prix des biens et services requis pour la reconstruction à la suite des catastrophes (voir par exemple, Benson et Clay [2004] ou RMS [2005]).

Ces contraintes peuvent hausser considérablement le coût total d'une catastrophe en rallongeant la durée de la période de reconstruction : ainsi, au coût de remplacement d'une usine détruite, il faut par exemple ajouter la perte de production pendant le délai réel de reconstruction, qui peut atteindre plusieurs années. De même, dans l'habitat, la destruction d'une maison qui ne peut être reconstruite avant un an a un coût total égal au coût de reconstruction de la maison, plus la valeur d'un an de « service logement » produit par la maison. La valeur de cette perte de production au sens le plus large peut être très élevée, surtout quand des besoins fondamentaux sont en jeu (logement, santé, emploi, etc.). Appliquée à l'ensemble du système économique, cette différence peut être significative, principalement pour les catastrophes de grande échelle. Par exemple, si on suppose que Katrina a détruit pour 100 milliards de dollars de capital, et que ce capital va être remplacé sur une période comprise entre 5 et 10 ans, et si on utilise une productivité moyenne du capital de 23 %¹², on peut estimer les pertes de production dues à Katrina entre 58 et 117 milliards de dollars. La prise en compte de la perte de production augmente donc le coût total de la catastrophe d'entre 58 et 117 %. Et on ne considère pas ici : (i) les rétroactions macroéconomiques, via les pertes d'emplois par exemple ; (ii) les effets redistributifs, les plus pauvres étant souvent les plus touchés ; et (iii) les conséquences sociales, que les victimes de Katrina n'ont pas fini de subir.

12. Comme on considère la destruction d'une partie indéterminée du capital et non de l'ajout ou de retrait d'une partie choisie du capital, il faut utiliser la productivité moyenne et non la productivité marginale. Compte tenu du rôle particulier des infrastructures, cette hypothèse est même plutôt optimiste (pour les détails, voir Hallegatte *et al.* [2007b]). La productivité marginale du capital aux États-Unis est d'environ 7 %. En supposant une fonction de production de Cobb-Douglas avec une répartition entre les revenus du capital et les revenus du travail de 30 %/70 %, la productivité moyenne du capital (Y/K) est 1/0,30 fois la productivité marginale (dY/dK). La productivité moyenne est donc proche de 23 %.

2.2. Conséquence sur les impacts du changement climatique

Il est extrêmement important de considérer les catastrophes naturelles une par une au lieu de ne prendre en compte que leur coût annuel moyen (comme par exemple Tol [1995]). Par exemple, au moins un modèle de cyclone (Emanuel [2006]) suggère que le changement climatique pourrait causer une augmentation de 50 % des pertes économiques annuelles moyennes dues aux cyclones aux États-Unis, de 8 à 12 milliards de dollars par an (Hallegatte [2007]). Moyenné sur une longue période, cette augmentation semble gérable. Mais si on regarde les événements un par un, et qu'on se concentre sur les plus violents, on trouve que la probabilité annuelle qu'un cyclone de catégorie 5 touche la côte américaine pourrait être multiplié par 4, passant de un tous les 20 ans à un tous les 5 ans. Gérer un cyclone de catégorie 5 sur les États-Unis tous les cinq ans est considéré par les gestionnaires de risque comme un vrai challenge. Ainsi, l'augmentation du coût moyen n'est pas vraiment inquiétante, ce sont les risques les plus extrêmes qui semblent poser problème. Les évaluations de dommages qui ne s'intéressent qu'aux valeurs moyennes sous-estiment donc clairement l'augmentation du risque et ses conséquences économiques.

En effet, si on suppose que la période de reconstruction augmente linéairement avec les pertes directes (c'est-à-dire qu'il faut deux fois plus de temps pour réparer les dégâts d'un cyclone qui a détruit deux fois plus de capital), alors les pertes économiques totales vont augmenter comme le carré des pertes directes. Cette propriété a des conséquences sur le coût économique du changement climatique. En effet, on pense que ce dernier risque de provoquer une augmentation de l'intensité des cyclones, mais surtout – voire uniquement – pour les cyclones les plus intenses¹³. Les cyclones causent aujourd'hui environ 8 milliards de dollars de pertes directes annuelles moyennes aux États-Unis. En guise d'illustration, et en simplifiant à l'extrême, supposons que ces pertes soient dues à deux types d'événements : des événements courant, qui provoquent 7 milliards de dollars de dommages tous les ans ; et des événements très rares, qui se produisent une fois tous les 100 ans et provoquent 100 milliards de dollars de dommages à chaque occurrence. Admettons maintenant que les pertes totales annuelles (incluant les pertes de production et les effets sociaux et indirects) atteignent 15 milliards de dollars par an en moyenne, 5 milliards pour les événements courants et 10 pour les événements rares¹⁴. On suppose qu'en raison du changement climatique, les pertes directes moyennes annuelles augmentent de 50 %, pour passer de 8 à 12 milliards de dollars par an, et

13. Les modèles suggèrent qu'il est possible que le nombre total de cyclones diminue légèrement, mais que le nombre de cyclones intenses (catégories 4 et 5) augmente de manière importante.

14. Pour illustrer, on suppose que les pertes totales sont égales au dixième des pertes directes au carré, ce qui revient à dire que les pertes totales peuvent être inférieures aux pertes directes pour les « petits événements ». Ceci est conforme à l'expérience : face à de petits événements, la réponse de l'économie et la demande additionnelle venant de la reconstruction permettent de diminuer le coût total.

que cette augmentation se fait en augmentant de 5 % les pertes dues aux événements fréquents (qui passent de 7 milliards par an à 7,35 milliards par an) et en multipliant par 5 la fréquence des événements rares (qui passe de un tous les 100 ans à un tous les 20 ans). Si on s'intéresse maintenant aux pertes économiques totales, et avec les hypothèses simplistes ci-dessus, alors on constate que l'augmentation de 50 % des pertes directes se transforme en une augmentation de 270 % des pertes indirectes, de 15 à 55 milliards de dollars par an. Ici, la non-linéarité des pertes totales agit comme un multiplicateur de dommages, qui amplifie le coût du changement.

2.3. Catastrophes naturelles, changement climatique et trappes à pauvreté

On vient de voir que le coût d'une catastrophe dépend de la durée de la période de reconstruction. Or, on sait que cette durée dépend de la capacité de reconstruction de l'économie touchée. Le problème est que les pays en voie de développement, qui ont moins de ressources, ne peuvent mener la reconstruction aussi rapidement et efficacement que les pays riches. Ce mécanisme peut contribuer à expliquer l'existence de *trappes à pauvreté* dans lesquels certains pays pauvres semblent être enfermés : parce qu'ils sont pauvres, ils n'ont qu'une faible capacité à mener à bien la reconstruction après chaque catastrophe. À cause de cette faible capacité et d'une large exposition à des événements dangereux (cyclones tropicaux, inondations de mousson, sècheresses), des catastrophes en série peuvent les empêcher d'accumuler des infrastructures et du capital productif, et donc de développer leur économie, et par là d'améliorer leur capacité à reconstruire après un désastre (voir les détails dans Hallegatte *et al.* [2007b]). Ce cercle vicieux peut maintenir certains pays (par exemple le Guatemala depuis les années 1990) à un niveau inférieur de développement économique. D'ailleurs, les agences de développement vont dans ce sens quand elles placent la capacité de gestion des risques de catastrophes au cœur des politiques de développement (Freeman *et al.* [2002]).

Si le changement climatique provoque une augmentation de la fréquence et/ou de l'intensité des événements extrêmes, ce qui est probable, ces trappes à pauvreté pourraient s'élargir, avec des impacts importants sur le développement économique de certaines régions¹⁵. Une réduction, même limitée, du taux de croissance des pays en développement aurait des conséquences majeures sur le bien-être et le revenu, et tout particulièrement sur les populations les plus pauvres (Freeman *et al.* [2002]). Ce risque, qui a été très bien décrit dans le Rapport Stern et un certain nombre d'autres articles (p. ex, Benson and Clay [2004]), n'a pas été pleinement pris en compte dans les modèles d'évaluation intégrée. Pourtant, en négligeant cet

¹⁵. Cet impact des catastrophes naturelles s'ajoutant aux autres contraintes environnementales subies par les pays en voie de développement, qu'elles soient liées ou non au changement climatique.

aspect du changement climatique, on risque tout simplement d'oublier l'essentiel des dommages.

En conclusion, les méthodologies utilisées pour évaluer les dommages du changement climatique ne sont pas capables de reproduire les conséquences des catastrophes, et elles considèrent des événements comme le cyclone Katrina comme anodins, ce qui semble en décalage avec l'expérience. Aussi, pour produire des estimations crédibles du coût du changement climatique, les modèles d'évaluation intégrée vont devoir progresser dans leur prise en compte des chocs et des processus de court terme, et se concentrer sur les interactions entre les impacts environnementaux et le développement économique.

Bien sûr, il ne faut pas négliger le fait que le coût des événements extrêmes va beaucoup dépendre de comment les sociétés se montreront capables de gérer des risques en évolutions. Elles pourront, en effet, améliorer les infrastructures de défense contre les inondations (digues, barrages, etc.), créer et maintenir des systèmes d'alerte efficaces, mettre en œuvre des politiques de réduction de la vulnérabilité (normes de construction, plans locaux d'urbanisme), voire abandonner certaines zones où le risque devient trop grand. Si les sociétés s'adaptent parfaitement, il n'est pas impossible que les dommages restent limités dans les pays qui auront les moyens (financiers, techniques et institutionnels) de mettre en œuvre ces mesures. Mais les pays pauvres risquent d'être confrontés à un manque de ressources pour de tels investissements. Et dans les autres pays, quelques expériences passées appellent à la prudence : la plupart du temps, quand les risques augmentent avec le temps, ils ne sont gérés correctement qu'après qu'une catastrophe majeure a eu lieu (par exemple, les Pays-Bas après les inondations de 1953 et leurs 1 800 victimes, ou la France après la canicule de 2003 et ses 5 000 victimes). Et parfois, la répétition de catastrophes ne suffit même pas pour mettre en place des systèmes rigoureux de gestion du risque (par exemple, la Nouvelle Orléans et ses inondations de 1915, 1947, 1965 et 2005). Notre capacité à gérer le risque avec anticipation, c'est-à-dire sans subir une catastrophe en guise de signal de l'augmentation du risque, est donc limitée, et il serait dangereusement trompeur d'évaluer les dommages du changement climatique en surestimant cette capacité d'anticipation.

*
* *
*

Cet article s'est concentré sur notre incapacité à évaluer les dommages du changement climatique. On sait très peu de choses sur les conséquences économiques des catastrophes naturelles, même si elles se produisent régulièrement et nous fournissent quantité de données. Il n'est donc pas surprenant qu'on ignore presque tout des conséquences économiques futures de changements climatiques qui n'ont jamais été vécus auparavant. Par ailleurs, il est compréhensible qu'un problème aussi nouveau, par sa nature et son ampleur, soit difficile à étudier en utilisant des outils qui ont été développés pour étudier des questions très différentes, comme la croissance économique en réponse aux changements démographiques et technolo-

giques. Des outils nouveaux, capables de représenter les interactions entre l'environnement et les sociétés, doivent être développés pour aller plus loin.

Cet article propose quelques pistes pour aller dans ce sens. En particulier, il souligne le fait que dans toute évaluation des dommages du changement climatique, il serait trompeur de penser à un climat stabilisé, alors que le climat va changer rapidement au cours des prochaines décennies. Ainsi, il faut poser le problème en terme d'adaptation des systèmes socio-économiques à un climat en évolution, donc plus incertain. Pour explorer ce problème d'adaptation, il est nécessaire de faire des hypothèses fortes sur le fonctionnement des économies futures (par exemple sur les anticipations, sur les processus d'adaptation, sur les mécanismes économiques de court terme). Ces hypothèses créent une incertitude supplémentaire sur les évaluations de dommage, et des calculs de coin de table suffisent pour montrer leur importance. Ainsi, au-delà du problème – essentiel – du taux d'actualisation, un pessimisme prudent sur le changement climatique peut être justifié par les mécanismes présentés ici : le rôle de l'incertitude et de l'inertie ; les conséquences des chocs et des événements extrêmes ; les interactions entre les contraintes environnementales et le développement économique ; l'imparfaite capacité de nos sociétés à gérer des risques en évolution.

Pour conclure, il est important de souligner le fait que le changement climatique va poser des problèmes particulièrement aigus dans certains pays ou régions (p. ex. le Moyen-Orient), menaçant probablement les besoins fondamentaux de certaines populations (accès à l'eau, sécurité alimentaire). Dans de tels cas, les mécanismes de propagation régionale risquent d'être importants, et de graves questions de conflictualité, de migration de masse, et de sécurité internationale pourraient se poser (voir un dossier sur ce thème dans Hallegatte et Ambrosi [2006]). Evidemment, on est pour l'heure incapable d'évaluer ces risques, et encore moins de les chiffrer économiquement, mais il est important de ne pas les négliger pour autant.

Face à ces questions, l'incertitude sur les dommages du changement climatique semble plus importante que jamais, et tous les chiffres publiés, optimistes ou pessimistes, doivent donc être pris avec beaucoup de précaution. Face à ces incertitudes radicales, et compte tenu de l'enjeu pour les générations futures, on peut douter de l'applicabilité directe de l'analyse coût-bénéfice. Il semble donc nécessaire de développer des méthodes de décision alternatives, plus adaptées au risque climatique et aux échelles de temps concernées. Mais dans tous les cas, on peut affirmer que si nos économies sont capables de faire face sans difficulté aux contraintes environnementales liées au changement climatique, alors il est difficile d'imaginer comment elles pourraient être menacées par une taxe de 80 dollars¹⁶ par tonne de CO₂, suffisante pour stabiliser les concentrations de gaz à effet de serre et limiter le risque climatique.

16. D'après le 4^e rapport du troisième groupe de travail du GIEC, le prix du carbone devrait atteindre entre 20 et 80 dollars par tonne de CO₂ en 2030 pour stabiliser les concentrations de gaz à effet de serre autour de 550 ppm de CO₂eq.

Références bibliographiques

- ADAM M., SHELL A. [2004], « Storms dash dreams of Florida home », *USA Today*, September 17.
- AMBROSI P., HOURCADE J.-C., HALLEGATTE S., LECOCQ F., DUMAS P., HADUONG M. [2003], « Optimal Control Models and Elicitation of Attitudes towards Climate Damages », *Environmental Modeling and Assessment*, 8, pp. 133-147.
- BENSON C., CLAY E. [2004], *Understanding the economic and financial impact of natural disasters. The International Bank for Reconstruction and Development*, The World Bank, Washington D.C.
- DIETZ S., HOPE C., STERN N., ZENGHELIS D. [2007], « Reflections on the Stern Review. (1) A robust case for strong action to reduce the risks of climate change », *World Economics*, 8, pp. 121-168.
- EMANUEL K. [2005], « Increasing destructiveness of tropical cyclones over the past 30 years », *Nature*, 436, pp. 686-688.
- EMANUEL K. [2006], « Climate and tropical cyclone activity : A new model downscaling approach », *Journal of Climate*, 19, pp. 4797-4802.
- FREEMAN P.K., MARTIN L.A., MECHLER R., WARNER K., HAUSMAN P. [2002], « Catastrophes and Development, integrating natural catastrophe into development planning, Disaster Risk Management », Working Paper Series.
- HALLEGATTE S. [2006], « A cost-benefit analysis of the New Orleans Flood Protection System », Regulatory Analysis 06-02, AEI-Brookings Joint Center, March 2006.
- HALLEGATTE S., AMBROSI P. (Eds.) [2006], *Environnement, Changement Climatique et Sécurité*, Numéro spécial n° 63 des Cahiers de la Sécurité, INHES.
- HALLEGATTE S. [2007], « Using synthetic hurricane tracks in risk analysis and climate change damage assessment », *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, in press, available on <http://www.centre-cired.fr/forum/article424.html>.
- HALLEGATTE S., HOURCADE J.-C., AMBROSI P. [2007a], « Using climate analogues for assessing climate change economic impacts », *Climatic Change*, 82, pp. 47-60, <http://dx.doi.org/10.1007/s10584-006-9161-z>
- HALLEGATTE S., HOURCADE J.-C., DUMAS P. [2007b], « Why economic growth matters in assessing climate change damages : illustration on extreme events », *Ecological Economics*, 62, pp. 330-340, <http://dx.doi.org/10.1016/j.ecolecon.2006.06.006>
- HALLSTROM D.G., SMITH V.K. [2005], « Market response to hurricanes », *Journal of Environmental Economics and Management*, 50, pp. 541-561.
- HOPE C. [2006], « The marginal impact of CO2 from PAGE2002 : an integrated assessment model incorporating the IPCC's five reasons for concern », *Integrated Assessment*, 6, pp. 19-56.
- LANDSEA C.W. [2005], « Meteorology : Hurricanes and global warming », *Nature*, 438, pp. E11-E13.
- MECHLER R., HOCHRAINER S., LINNEROOTH-BAYER J., PFLUG G. [2006], « Public sector financial vulnerability to disasters », in J. Birkmann (Ed.), *Measuring Vulnerability and Coping Capacity to Hazards of Natural Origin – Toward Disaster Resilient Societies*, United Nations University Press, Tokyo.

- MENDELSON R., MORRISON W., SCHLESINGER M., ANDRONOVA N. [2000], « Country-specific market impacts of climate change », *Climatic Change*, 45, pp. 553-569.
- MENDELSON R., WILLIAMS L. [2004], « Comparing Forecasts of the Global Impacts of Climate Change », *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change*, 9, pp. 315-333.
- NORDHAUS W., BOYER R. [2000], *Warming the world : economics models of climate change*, MIT Press, Cambridge (MA, USA).
- NORDHAUS W.D. [2006a], « Geography and macroeconomics : New data and new findings », *Proceedings of the National Academy of Sciences*, May 2006.
- NORDHAUS W.D. [2006b], « A Review of the Stern Review on the Economics of Global Warming », available on <http://nordhaus.econ.yale.edu/SternReviewD2.pdf>.
- RMS [2005], « Hurricane Katrina : Profile of a Super Cat, Lessons and Implications for Catastrophe Risk Management », available on www.rms.com
- ROAF S., CRICHTON D., NICOL F. [2005], *Adapting Buildings and Cities for Climate Change*, Architectural Press, Elsevier.
- SMITH J.B. *et al.* [2001], « Vulnerability to climate change and reasons for concern : a synthesis, Climate Change 2001 : Impacts, Adaptation and Vulnerability », in Intergovernmental Panel on Climate Change, Cambridge University Press, Cambridge, pp. 913-967.
- STERN N. *et al.* [2006], *The Stern Review on the Economics of Climate Change*, available on <http://www.hm-treasury.gov.uk>
- THOMAS C. *et al.* [2004], « Extinction risk from climate change », *Nature*, 427, pp. 145-148.
- TOL R. [1995], « The damage costs of climate change : Toward more comprehensive calculations », *Environmental and Resource Economics*, 5, pp. 353-374.
- TOL R. [2002a], « New estimates of the damage costs of climate change, Part I : Benchmark estimates », *Environmental and Resource Economics*, 21, pp. 47-73.
- TOL R. [2002b], « New estimates of the damage costs of climate change, Part II : Dynamic estimates », *Environmental and Resource Economics*, 21, pp. 135-160.
- TOL R. [2006], « The Stern Review on the economics of climate change : a comment », available on <http://www.fnu.zmaw.de/fileadmin/fnu-files/reports/sternreview.pdf>
- TOL R., YOHE G. [2006], « A review of the Stern Review », *World Economics*, 7, pp. 233-250.
- TRENBERTH K. [2005], « Uncertainty in Hurricanes and Global Warming », *Science*, 308, pp. 1753-1754.
- WATKISS P. *et al.* [2005] : *Methodological Approaches for Using Social Cost of Carbon Estimates in Policy Assessment, Final Report*, AEA Technology Environment, Culham.
- WEBSTER P.J., HOLLAND G.J., CURRY J.A., CHANG H.-R. [2005], « Changes in Tropical Cyclone Number, Duration, and Intensity in a Warming Environment », *Science*, 309, pp. 1844-1846.
- YOHE G. [2006], « Some thoughts on the damage estimates presented in the Stern Review – An Editorial », *The Integrated Assessment Journal*, 6, pp. 65-73.
- YOHE G.W., ANDRONOVA N.G., SCHLESINGER M.E. [2004], « To Hedge or Not Against an Uncertain Climate Future », *Science*, 306, pp. 416-417.