

# L'évaluation économique des dommages du changement climatique

**Stéphane Hallegatte**

Centre international de recherche sur l'environnement et le développement (Cired)

Campus du Jardin tropical

45 bis, avenue de la Belle-Gabrielle - 94736 Nogent-sur-Marne Cedex et Météo-France - Centre national de recherches météorologiques

hallegatte@centre-cired.fr

## Résumé

Le changement climatique aura des effets sur l'environnement, la vie animale, le cadre de vie. Il aura aussi des conséquences économiques. Pour les étudier, des modèles d'impact, utilisant en entrée les prévisions climatiques, tentent de reproduire la complexité des processus réels. Ils fournissent des évaluations des dommages en termes de coût. Ces résultats sont les meilleures inférences disponibles sur ce problème crucial, mais doivent être appréciés avec prudence, la conception desdits modèles étant encore en plein développement.

## Abstract

### Economic evaluation of climate change damages

Climate change will affect the environment, animal life and the human way of life. It will also have economical consequences. The study is made with impact models, which use climatic forecast as input and try to reproduce the complexity of the real processes, to supply estimates of the financial cost of the damage. These results are the best available on this crucial matter, but they must be considered with caution because the models are still being developed.

Presque tous les pays du monde ont ratifié la Convention cadre des Nations unies sur le changement climatique, qui est entrée en vigueur le 21 mars 1994. Par cette ratification, ces pays ont explicitement reconnu la nécessité de « stabiliser [...] les concentrations de gaz à effet de serre dans l'atmosphère à un niveau qui empêche toute perturbation anthropique dangereuse du système climatique » (article 2 de la convention). Cependant, la convention ne dit rien de ce niveau et, au moment de déterminer l'ambition des mesures à prendre pour limiter le changement climatique, le débat s'est centré sur la définition de ce qui constitue une **perturbation dangereuse du système climatique**.

Une première réponse peut être donnée, en se fondant simplement sur quelques faits scientifiques largement acceptés :

- en l'absence de mesures énergiques, la composition de l'atmosphère sera fondamentalement modifiée par l'action de l'homme ;
- ce changement dans sa composition induit une perturbation significative du climat ;
- le système climatique est un système complexe, instable, capable de basculements importants et très mal compris ;
- le climat stable actuel est à la base de notre existence depuis plusieurs millénaires (notamment depuis la sédentarisation) ;
- sur lui reposent, entre autres, la production de nourriture, la disponibilité de l'eau, ainsi que la qualité de l'air.

La canicule de 2003 a fortement affecté la santé des Français. Ici des membres de la Croix-Rouge distribuent de l'eau à l'hôpital Saint-Antoine à Paris. (© AFP, Jean Ayissi)





Cette canicule a aussi dopé les ventes d'eau minérale. (© AFP, Mychèle Daniau)

*économique puisse se poursuivre d'une manière durable ».*

L'idée d'un arbitrage entre un délai de stabilisation suffisamment court pour éviter des pertes environnementales trop importantes et un délai assez souple pour ne pas mettre à mal la croissance économique était donc déjà explicite. C'est cette double contrainte qui a ensuite focalisé les travaux vers la recherche de **trajectoires** d'émissions optimales visant à limiter, à la fois, les dommages liés aux impacts du changement climatique et les coûts des réductions d'émissions.

On peut donc dire que, strictement, le risque associé à toute perturbation significative d'un système aussi vulnérable, mal compris et fondamental pour notre existence rend cette perturbation dangereuse. Toutefois, face aux coûts importants des réductions des émissions, au manque d'éléments concrets pour justifier l'existence du risque, et surtout au besoin de se fixer un objectif et un calendrier de l'action qui soient tenables économiquement et socialement, le critère de dangerosité s'est révélé totalement inadapté. Il ne faut pas oublier en effet que réduire trop brutalement les émissions nécessiterait une réorganisation rapide de l'économie qui ne pourrait se faire sans coûts importants : chômage<sup>(1)</sup>, perte de pouvoir d'achat (notamment pour les classes populaires), conflits sociaux...

Est donc apparue une demande forte d'évaluation des dommages, pour justifier l'action et son rythme. Cette demande était d'ailleurs en germe dans la suite de l'article 2 de la Convention quand il affirmait qu'il « *convient d'atteindre ce niveau dans un délai suffisant pour que les écosystèmes puissent s'adapter naturellement aux changements climatiques, que la production alimentaire ne soit pas menacée et que le développement*

Ces travaux, et les trajectoires optimales qu'ils proposent, s'appuient sur des évaluations quantifiées des impacts et des dommages, dont les résultats ont donc une grande importance. On va proposer ici une revue critique des études actuellement disponibles, concernant d'abord les analyses d'impacts, pas forcément négatifs pour l'homme, puis les mécanismes pouvant conduire à des pertes de bien-être pour les populations.

## Les impacts potentiels du changement climatique

Il paraît évident qu'un changement de climat tel que le prévoient les modèles climatiques aurait d'importantes répercussions sur les écosystèmes et sur nos sociétés. Toutefois, ces impacts sont difficiles à anticiper en raison de notre mauvaise connaissance de la réponse des écosystèmes et des sociétés à des changements environnementaux majeurs. Cela explique pourquoi le Groupe intergouvernemental d'experts sur l'évolution du climat (Giec), dans le Résumé pour décideurs du troisième rapport, ne donne pas d'information

chiffrée sur les seuils dangereux. Malgré cette difficulté, nous allons passer en revue dans cette première partie les différents impacts envisageables qui pourraient avoir des conséquences sur les sociétés et les économies.

## Des observations aux prévisions

De nombreux changements dans les écosystèmes sont actuellement observés, changements dont le réchauffement climatique pourrait être responsable. D'après Parmesan et Yohe (2003), plus de 80 % des modifications actuellement observées dans la répartition de espèces sont cohérentes avec le réchauffement climatique.

En ce qui concerne les sociétés, on peut signaler que les coûts des événements extrêmes ont largement augmenté au cours de la seconde moitié du vingtième siècle, mais sans que l'on puisse attribuer cet effet au changement climatique, ni même à une augmentation de la fréquence ou de l'intensité des événements météorologiques extrêmes. L'augmentation de ces coûts peut être totalement expliquée par la variation de la vulnérabilité des sociétés, liée à l'urbanisation, à la croissance de la population et à la croissance économique (Easterling et al., 2000). En revanche, certains effets du changement climatique sur l'agriculture sont fortement soupçonnés, par exemple des modifications des dates de vendanges (Seguin, 2002), sans que l'on puisse être totalement conclusif.

Mais l'enjeu principal reste la prévision des impacts futurs. De très nombreuses études visant à les prédire ont été conduites, souvent dans le cadre de grands projets de recherche (par exemple Acacia en Europe (Parry, 2000) ou le National Assessment of Climate Change (NACC) aux États-Unis). Les travaux fondés sur le modèle Image (Alcamo, 1994) ont été également très novateurs, car Image a été le premier modèle réellement intégré, c'est-à-dire visant à prendre en compte tous les sous-systèmes, depuis le cycle du carbone, la dynamique climatique, la réaction des écosystèmes jusqu'aux impacts sur la production et le commerce agricole<sup>(2)</sup>.

(1) En guise d'illustration, on peut mentionner que 800 000 emplois en France sont liés à l'industrie automobile.

(2) Seules les dynamiques démographiques et économiques sont explicitement exogènes dans le modèle.



Vendanges en Champagne le 21 août 2003.  
(© AFP, Alain Julien)

Ces études proposent un grand nombre d'évaluations des impacts que l'on doit attendre dans certains secteurs ou écosystèmes, et dans certaines régions ; elles se fondent pour cela sur des hypothèses précises concernant les émissions futures et la sensibilité du climat. Ainsi, parce qu'elles sont très locales et très parcellaires, il est difficile d'en déduire des conclusions sur la vulnérabilité d'ensemble du globe au changement climatique. En guise d'illustration, les parties suivantes vont passer en revue un certain nombre d'études d'impacts sur différents systèmes.

### Des impacts potentiels inquiétants sur les écosystèmes et la végétation

Les études de vulnérabilité montrent clairement que les effets potentiels du changement climatique sur les écosystèmes sont très importants, en particulier pour les plus vulnérables comme les récifs coralliens, qui pourraient disparaître à assez court terme à cause du réchauffement des eaux, ou les zones basses (espaces deltaïques, marais, mangroves), mises en danger par la montée du niveau de la mer.

Le facteur essentiel reste le rythme du changement climatique, comparé aux capacités d'adaptation des écosystèmes (WBGU, 1997). Or, la vitesse du changement prévu (quelques degrés en quelques

décennies) est largement plus rapide que tous les changements climatiques naturels connus. Il est donc vraisemblable que le réchauffement d'origine anthropique soit plus destructeur que les variations naturelles du climat. Ainsi, Thomas et al. (2004) n'hésitent pas à parler d'extinction massive d'espèces dès 2050. Malgré les immenses incertitudes dans ce domaine, le risque de catastrophe écologique est donc bien réel.

## Les impacts directs sur les sociétés

### Les impacts sur l'économie

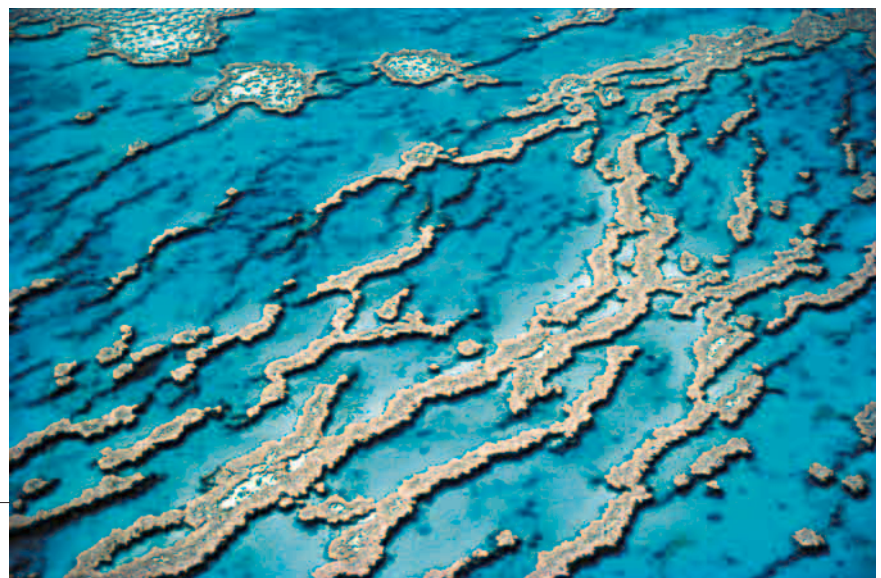
Les impacts sur l'agriculture ont été largement étudiés au cours des vingt dernières années. La conclusion générale

est que le changement climatique ne mènera pas à une rupture à l'échelle mondiale de la production agricole et que la planète devrait rester capable de nourrir sa population. Toutefois, à l'échelle régionale, des transformations importantes sont à attendre et les problèmes liés à la sécurité alimentaire pourraient se multiplier (Fischer et al., 2002).

Aujourd'hui, un milliard sept cent millions de personnes, c'est-à-dire 20 % de la population mondiale, vivent dans des régions où les ressources en eau sont menacées (c'est-à-dire que plus de 20 % du flux est exploité). Vörösmarty et al. (2000) ont montré que l'évolution de cette situation dépend avant tout, sur le court terme, du scénario démographique et socio-économique que l'on considère<sup>(1)</sup>. Le changement climatique risque d'aggraver ce problème dans certaines régions, notamment la région méditerranéenne, pour laquelle on attend un assèchement marqué en été, ainsi que les petites îles, l'Asie centrale et le sud de l'Afrique.

Les infrastructures seront probablement fortement touchées par le changement climatique. Un exemple évident concerne les infrastructures du tourisme de montagne (Martin, 2000). Mais la montée du niveau des océans risque de bouleverser de façon bien plus importante un certain nombre d'infrastructures et d'implantations humaines, en provoquant un recul du trait de côte (de 50 à

(1) Toutefois, on ne dispose pas d'études précises à long terme sur ces questions.



La Grande Barrière de Corail, près de l'Australie, est menacée par l'accroissement de température de l'océan. (© BSIP/OSF/Aquavisuals)



Site de permafrost à Kvadehuksletta, au Spitzberg.  
(Photo Ólafur Ingólfsson, www.hi.is/~oi/)

100 mètres en Europe du Nord en 2080 selon Parry (2000)). Si le niveau de la mer montait de 40 cm, Nicholls et al. (1990) évaluent que le nombre de personnes touchées annuellement par une inondation passerait de 13 millions à 93 millions, même si d'importantes mesures d'adaptation étaient prises. La fonte du permafrost dans les zones montagneuses et boréales imposera aussi des travaux de rénovation ou de reconstruction d'infrastructures (bâtiments, routes, pipelines, mines...), car leurs fondations ne sont pas adaptées à des sols non gelés (Weller et Lange, 1999).

### Les impacts sur la santé

L'effet du climat sur la santé pourrait jouer un rôle majeur, mais il est loin d'être indépendant du scénario de développement retenu. En effet, l'influence du climat sur la santé diminue globalement avec la richesse. Cependant, le réchauffement pourrait modifier de manière sensible les risques auxquels les populations sont soumises (Besancenot et al., 2002).

### Les événements extrêmes, amplificateurs du changement

Les événements extrêmes, que l'on définit souvent comme des événements rares et de forte intensité, constituent aujourd'hui l'un des principaux canaux par lesquels le climat influence l'économie. Selon les compagnies de réassurance, par exemple Swiss Ré (Swiss Ré,

2004), ils touchent plus d'un million de personnes chaque année et sont responsables d'un grand nombre de victimes et de pertes économiques importantes. Ils sont également suspectés de représenter des obstacles majeurs au développement économique des pays les plus pauvres, car ils détruisent les infrastructures nécessaires à ces pays (Benson et Clay, 2004). Ainsi, les chocs de court terme peuvent menacer les trajectoires de croissance de long terme, en particulier dans les pays où les moyens de reconstruction sont limités par des contraintes techniques ou financières (Hallegatte, 2005a).

Et l'effet potentiel du changement climatique sur les extrêmes est particulièrement inquiétant. En effet, les extrêmes jouent un rôle de multiplicateur du changement. Par exemple, pour une élévation de seulement quelques degrés de la température moyenne, la

canicule de 2003 sur l'Europe, qui est un événement très rare dans le climat actuel (Schär et al., 2004), correspond à un été ordinaire en 2080 selon la plupart des modèles climatiques (Beniston, 2004 ; Déqué, 2004). Des motifs d'inquiétude viennent aussi d'autres facteurs météorologiques : la modification des précipitations pourrait avoir des conséquences importantes sur les probabilités d'inondation, ainsi que l'illustre le travail de Christensen et Christensen (2003) sur les inondations estivales en Europe.

### Les interactions entre impacts, principales sources d'incertitudes

Tous ces impacts directs interagissent, se compensent ou s'amplifient, ce qui rend leur prédiction encore plus difficile. Par exemple, l'adaptation des stations de ski au manque de neige pourrait se faire grâce à de la neige artificielle. Mais fabriquer de la neige artificielle consomme énormément d'eau, alors qu'il y a déjà une forte compétition pour l'usage de cette ressource en hiver en montagne (eau potable, agriculture, hydroélectricité...) et que les régimes hydrologiques pourraient varier à cause du réchauffement. Autre exemple, la montée du niveau de la mer pourrait interagir avec une éventuelle augmentation de l'intensité des tempêtes pour créer des marées de tempête bien plus importantes qu'aujourd'hui.



Les stations de ski (ici Saint-Lary, dans les Pyrénées) risquent de pâtir du changement climatique.  
(Photo Météo-France, Frédéric Gromat)

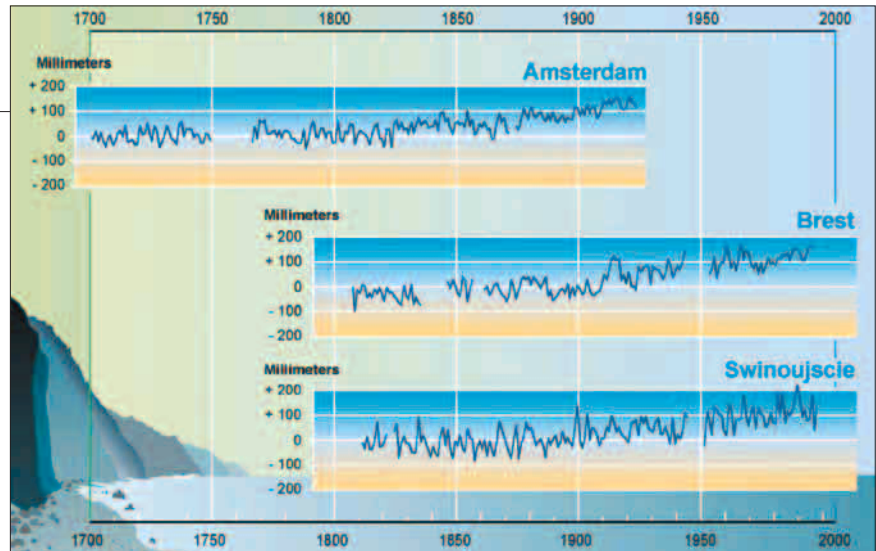
Évaluation de l'élévation du niveau de la mer au cours des 300 dernières années à Amsterdam, Brest et Swinoujscie (Pologne). (Source Giec)

## Qu'est-ce qu'un dommage climatique ?

À partir des impacts potentiels que l'on vient de décrire, définir un dommage climatique n'est pas aussi évident qu'il y paraît. Combien de Parisiens seraient heureux d'apprendre que leur climat pourrait ressembler à celui de Barcelone en 2070 ? À moins d'admettre que toute modification du climat d'origine humaine est à proscrire, considérer qu'un tel changement est un dommage demande de comprendre comment il réduira le bien-être des populations (pris au sens large, c'est-à-dire en tenant compte d'éventuels coûts psychologiques ou éthiques) et/ou en quoi il nécessitera une adaptation dont le coût (économique et humain) peut être important. Pour cela, nous allons décrire les différents canaux par lesquels les impacts du changement climatique vont toucher les sociétés, à partir des travaux de Ambrosi et Hourcade (2003), et montrer comment la réponse du système économique à ces impacts peut engendrer des coûts indirects qui sont loin d'être négligeables.

### Perte de productivité

Notre système socio-économique s'est construit en fonction du climat auquel il est soumis depuis toujours. On ne réalise pas facilement à quel point ce qui nous entoure est dépendant du climat. Depuis les habitations, leur forme, leur couleur, leur agencement, jus-



qu'aux réseaux de transport et aux systèmes énergétiques, tout a été bâti dans un climat où la variabilité naturelle reste suffisamment stable pour que l'on puisse la connaître par l'observation et suffisamment faible pour que l'on puisse s'y adapter facilement. Un changement des conditions climatiques usuelles pourrait donc provoquer une inadéquation de nos systèmes productifs, et ainsi une baisse de la productivité moyenne de l'économie.

### Accélération de l'obsolescence du capital et des infrastructures

Dans les secteurs où la productivité deviendra si basse que le capital installé devra être remplacé par du capital plus récent (par exemple, les systèmes de refroidissement des centrales thermiques ou les infrastructures qui ne répondront plus aux besoins), le coût du changement climatique prendra donc la

forme d'un « gaspillage » de capital : on aura investi dans des usines ou des infrastructures dont la durée de vie sera réduite par les nouvelles conditions climatiques. L'investissement initial aura donc été moins rentable que prévu.

Dans d'autres secteurs, c'est par un effet d'éviction que les dommages du changement climatique s'exprimeront : parce que certains secteurs demanderont des investissements massifs, d'autres secteurs se verront privés d'investissement. Cela pourrait mener à des diminutions importantes du taux de croissance.

À ces pertes de capital pour cause de productivité insuffisante ou d'éviction de l'investissement, s'ajoutera peut-être une diminution de la durée de vie du capital à cause d'une obsolescence prématurée due à des conditions météorologiques plus difficiles (par exemple, à cause d'inondations plus fréquentes).

### Altération des aménités<sup>(1)</sup> liées à l'environnement et au climat

Notre environnement et notre climat nous fournissent un grand nombre de services « directs », qui sont souvent négligés. On distingue en général (NRC, 2004) la **valeur d'usage** (randonnées en montagne, apéritifs en terrasse, après-midi à la plage..., autant d'activités dans lesquelles le climat et l'environnement jouent un rôle essentiel mais difficile à évaluer sous forme monétaire) de la **valeur d'existence**,

Inondation dans le Val-d'Oise en février 1995. (Photo Météo-France)



(1) L'aménité d'un climat ou d'un site peut se définir comme le plaisir que l'on en tire, en dehors de ses avantages pratiques et matériels.

que l'on peut attribuer à quelque chose qui n'a pourtant pas d'influence directe sur notre qualité de vie (par exemple l'existence d'espèces animales comme les baleines).

Lorsqu'on cherche à prendre en compte ces valeurs, on leur attribue souvent une valeur monétaire sous forme d'une **volonté à payer**, établie, soit par des enquêtes (Hanley et Spash, 1993), soit par la méthode dite « hédonique », qui fait intervenir des comparaisons entre les prix de l'immobilier dans des régions comparables mais de climat différent (Mendelsohn et al., 2000). Ces enquêtes et ces études restent cependant très peu crédibles et leurs résultats sont fortement contestés. Mais, même si l'on disposait d'évaluations crédibles, il reste l'hypothèse sous-jacente contestable qui consiste à supposer qu'il est toujours possible de substituer ces services environnementaux par leur valeur monétaire, donc par la production d'autres biens.

## Les coûts indirects

Les canaux précédents correspondent aux « entrées » des impacts climatiques dans l'économie. Il s'agit en quelque sorte des dommages de premier ordre. Mais le système économique va réagir à ces dommages de façon complexe, réduisant ou amplifiant les perturbations initiales.

## Propagations sectorielles

Tout d'abord, tous les secteurs économiques dépendent des infrastructures et de certains secteurs de base (énergie, eau, agriculture, matières premières...). Si ces secteurs sont touchés par le changement climatique, les conséquences peuvent s'étendre à tout le système économique. Ainsi, deux années de sécheresse ont perturbé la production hydroélectrique brésilienne. La montée du prix de l'électricité a mené à un reflux massif de son utilisation par la population, provoquant l'apparition de surcapacités de production les années suivantes, et un retour au chauffage par le bois et le charbon, avec des conséquences importantes sur la pollution locale et la pression sur l'environnement.

## Effets redistributifs

Les impacts du changement climatique, par exemple une recrudescence des événements extrêmes, pourraient avoir des effets sur la distribution des revenus et des richesses, avec des conséquences sur l'économie en général.

On peut illustrer cet effet par les conséquences des catastrophes naturelles. Elles ont des effets redistributifs dans les pays riches (destruction du bâti et création d'emplois peu qualifiés), et de forts effets antiredistributifs dans les pays en voie de développement (PVD), où les plus pauvres sont les premières victimes (paysans, mal-logés). Ainsi, le tsunami de décembre 2004 en Asie a jeté 2 millions de personnes sous le seuil de pauvreté.

## Propagations régionales, migrations et conflits

Les crises économiques récentes (Asie en 1997) ont montré à quel point les économies sont interdépendantes. Ainsi, il est évident que si un pays était durement touché par le changement climatique, ses voisins et ses principaux partenaires commerciaux seraient également touchés. Ces effets de propagation passeront par l'économie classique (flux de capitaux et de biens, anticipations), mais aussi par des migrations et des conflits.

Les exemples de migrations motivées par des problèmes économiques ou par des problèmes beaucoup plus fondamentaux d'accès à l'eau, de confort du climat ou de recherche de terres fertiles

ne manquent pas. On peut les classer en deux catégories :

- Les migrations qui suivent une catastrophe naturelle ponctuelle ; par exemple, les États-Unis ont accueilli un grand nombre de réfugiés suite au cyclone Mitch sur le Honduras (McLeman et Smit, 2003).
- Les migrations suite à des variations de long terme des conditions climatiques. Ainsi, pendant la longue période de sécheresse aux États-Unis dans les années 1930, de nombreux fermiers des grandes plaines ont migré vers la Californie, créant des bidonvilles, des problèmes d'hygiène et de santé et du chômage de masse ; de même, en Afrique de l'Est (Éthiopie, Soudan), les sécheresses des trente dernières années ont engendré des migrations de masse, causes de conflits et d'instabilité politique permanente (McLeman et Smit, 2003).

Les conflits pour l'usage des ressources sont aujourd'hui une source majeure de tensions internationales. Par exemple, il y a des régions dans lesquelles des tensions politiques fortes existent pour le contrôle de l'eau. À partir des travaux de P. H. Gleick, on peut citer les nombreux conflits des années 1970 pour le contrôle de l'eau au Moyen-Orient et en Afrique de l'Est : par exemple, l'Irak et la Syrie se sont disputé les eaux de l'Euphrate en 1974 et 1975, allant jusqu'à mobiliser leurs armées à la frontière ; l'Égypte et l'Éthiopie sont en conflit depuis 1978 à propos de la construction de barrages sur le Nil par l'Éthiopie. Ce dernier épisode a même amené Anwar Sadat à affirmer en 1979 : « *L'eau est la seule chose qui pourrait mener l'Égypte à la guerre aujourd'hui* ».



L'ouragan Mitch, touchant l'Amérique centrale le 28 octobre 1998. (Photo Météo-France)

## Inertie et incertitude : une source de dommages et un obstacle à l'adaptation

Même un changement climatique qui n'aurait que des impacts faibles (ou nuls) grâce à l'adaptation, s'il était précisément prédit un siècle ou plus à l'avance, peut avoir de graves conséquences s'il n'est pas anticipé à cause des incertitudes scientifiques et des difficultés de détection venant de la variabilité naturelle. On peut montrer sur des cas précis, par exemple sur l'adaptation de la ville de Paris (Hallegatte et al., 2005), que le jeu de l'incertitude sur le changement futur et de l'inertie des infrastructures peut être une source de dommages plus importante que les impacts directs en connaissance parfaite : si l'on savait dès aujourd'hui que le climat de Paris sera celui du sud de l'Espagne à la fin du siècle, on pourrait commencer à mettre en œuvre des mesures d'adaptation, par exemple dans l'immobilier, pour être prêt quand le changement climatique se manifesterait. Mais, en raison des incertitudes, une stratégie d'adaptation planifiée à l'avance (ex-ante) est difficile à concevoir, car elle doit être robuste aux erreurs de prédiction sur le climat futur. En revanche, une stratégie d'adaptation « exposé », en fonction du climat réellement observé, est simple à mettre en œuvre mais, si elle demande de longs délais d'installation, nous aurons à supporter une mauvaise adaptation pendant la période de transition.

Cette complexité explique pourquoi on trouve des travaux théoriques qui cherchent à construire une typologie des mesures d'adaptation (Smit et al., 1999 ; Callaway, 2002) ou à proposer des méthodologies pour guider la construction des stratégies d'adaptation (Fankhauser et al., 1999), mais peu d'évaluations des réductions de dommages que l'on peut attendre de différents types de stratégie.

## L'interaction avec les réductions d'émissions

Il faut envisager un scénario catastrophe où les sociétés ont à faire face à la fois à des impacts forts et répétés (par exemple, des vagues de chaleur) et, parce que cela démontre la nécessité de stabiliser les concentrations de gaz à effet de serre, à des mesures drastiques de réduction d'émissions. Ces réductions d'émissions pourraient alors interdire certains types d'adaptation

(par exemple, la généralisation de la climatisation) et handicaper la croissance économique, ce qui aggraverait les dommages liés au changement climatique. Cela montre qu'il n'y a pas d'indépendance entre l'évaluation des impacts et l'évaluation des coûts de réduction d'émissions : des dommages forts impliquent des réductions d'émissions rapides, dont les coûts s'ajoutent aux pertes directement dues au climat.

## Les évaluations des dommages « en statique »

Les premières évaluations des dommages du changement climatique n'ont été réalisées qu'il y a une quinzaine d'années. C'est donc encore un domaine neuf et largement inconnu. Toutefois, certains progrès ont été accomplis entre la première génération d'études (entre 1991 et 1995) et les études les plus récentes.

Le premier obstacle que l'on doit signaler est l'absence d'un consensus sur une norme de mesure des impacts sur les sociétés. En particulier, il est impossible de mettre en rapport de manière non controversée des impacts dans différentes régions du monde, ou des impacts touchant des générations différentes, ou même des impacts de natures différentes touchant les mêmes personnes (perte de confort/perte de productivité, par exemple). Cette impossible comparaison des dommages, qu'on appelle souvent « le problème de l'agrégation des dommages », est une limitation tout à fait indépassable des évaluations. Les études d'impacts se sont donc d'abord concentrées sur les pertes économiques mesurables, secteur par secteur et région par région. Seuls quelques auteurs ont cherché à rassembler l'ensemble de ces études pour construire un tableau d'ensemble des dommages climatiques, en utilisant des règles simples (et ouvertes au débat) pour comparer les dommages ayant lieu en différents endroits et à différentes époques.

Les premières évaluations des dommages ont été faites sur les États-Unis par Nordhaus (1991), Cline (1992), Tol (1995) et Fankhauser (1995). Elles prennent l'hypothèse d'un réchauffement climatique global compris entre 2,5 °C et 3 °C. Il s'agit d'études énumératives, qui considèrent une économie statique (le plus souvent l'économie actuelle), qui négligent les interactions entre secteurs et qui supposent qu'il n'y a aucune adaptation. Pour simplifier le problème, on néglige donc l'évolution de l'économie et on suppose que les impacts du changement climatique touchent l'économie d'aujourd'hui. On évite ainsi la délicate question de la prospective sur les modes de vie et les technologies à l'horizon de la fin du siècle. Les dommages sont ensuite évalués secteur par secteur. Par exemple, pour l'agriculture, on évalue la perte de productivité d'une agriculture donnée dans des conditions climatiques différentes et on multiplie ce chiffre par la part de l'agriculture dans l'économie d'un pays. On obtient ainsi le dommage économique lié au secteur agricole dans ce pays. En répétant cette approche sur les différents secteurs de l'économie, on obtient le dommage total pour le pays. Il faut signaler qu'avec cette méthodologie, on ne prend



Mais souffrant de la sécheresse, à Villacoublay, une image appelée à se renouveler. (Photo Météo-France)

pas en compte les importantes interactions entre les secteurs, comme l'interdépendance entre l'agriculture et les ressources en eau. D'après ces premières études, les dommages totaux pour les États-Unis s'étagent entre 1 et 2,5 % du PIB américain.

Ensuite, les auteurs ont étendu leurs analyses au reste du monde, par des méthodes simples. Par exemple, Nordhaus suppose que la vulnérabilité des régions côtières est fonction de la racine carrée du rapport de la surface côtière à la surface de la région. Les résultats des études de Tol (1995) et

Fankhauser (1995), qui utilisent des méthodes plus fines pour extrapoler aux autres régions du monde, donnent des pertes économiques d'environ 1 à 2 % pour les pays développés, jusqu'à 9 % pour l'Afrique et l'Amérique latine.

Dans un second temps, Mendelsohn et al. (2000), Nordhaus et Boyer (1999) et Tol (2002) ont proposé des études plus précises, pour des augmentations de la température globale comprises entre 1 °C et 2,5 °C. Elles profitent des nouvelles études d'impacts disponibles, en particulier sur les PVD ; elles portent une meilleure attention aux dommages non marchands, via des volontés à payer ; elles testent différentes hypothèses sur l'agrégation des dommages. De plus, elles prennent en compte une adaptation au changement climatique dans certains secteurs, notamment l'agriculture. Il faut toutefois noter que cette adaptation est supposée parfaite et que les études ne tiennent pas compte des difficultés de la transition entre l'adaptation à un climat et l'adaptation à un autre. Par exemple, si le nord de la France doit supporter les conditions du sud de l'Espagne, on suppose que les infrastructures et équipements français vont avoir, grâce à l'adaptation et quelle que soit la vitesse du changement, les mêmes performances que les infrastructures et équipements actuels en Espagne. Ces études ont évalué des pertes région par région légèrement inférieures à celles données par les études précédentes, allant de gains de 0,3 % du PIB pour les États-Unis à des pertes de 5 % du PIB pour l'Afrique.

Cependant, à cause de la grande hétérogénéité des dommages selon les régions, l'évaluation des dommages globaux change de signe selon la méthode d'agrégation retenue. Au-delà des doutes concernant la qualité de l'évaluation dans chaque secteur et chaque région, ce résultat suggère avant tout que le concept de dommage global est inadapté et que les dommages du changement climatique doivent être appréhendés régionalement.

## La prise en compte de la dynamique

Toutes les études précédentes ont en commun une limite fondamentale : elles ne considèrent qu'une économie statique, soumise à une concentration de CO<sub>2</sub> constante et connue de manière certaine. Or, le changement climatique

Le 22 juillet 2004, Serge Lepeltier, ministre de l'Environnement, présente le Plan climat, contenant les engagements de la France dans le cadre du protocole de Kyoto. (© AFP, Daniel Janin)

est un problème dynamique, en interaction forte avec les questions de développement. Il paraît donc indispensable d'effectuer l'évaluation dans plusieurs scénarios socio-économiques, pour prendre en compte l'évolution de la vulnérabilité avec le développement économique et l'augmentation de la population. De plus, la connaissance de la répartition temporelle des dommages permet la définition de « politiques optimales de réduction d'émissions », c'est-à-dire de politiques qui minimisent à la fois le coût des dommages du changement climatique et les coûts des politiques de réduction d'émissions. On cherche donc à régler l'ambition (veut-on stabiliser les concentrations à des valeurs hautes ou basses ?) et le tempo (va-t-on agir tout de suite ou attendre que des technologies nouvelles réduisent les coûts ?) des réductions de manière à réduire au maximum le coût total du changement climatique.

Dans de telles études, la prise en compte des impacts du changement climatique se fait par des **fonctions de dommages**, qui relient de manière plus ou moins ad hoc l'augmentation de la température globale aux dommages globaux, et qui sont calibrées sur un point, celui des études énumératives de dommages économiques. Ces études ne cherchent donc pas à évaluer les dommages de manière détaillée, mais plutôt à tirer les conséquences, en termes de politique optimale et en tenant compte de la dynamique, des évaluations ponctuelles réalisées par ailleurs. Les faiblesses des fonctions de dommages sont discutées en détail par Peck et Teisberg (1994) et par Ambrosi (2004) ; elles tiennent au caractère arbitraire de la forme des fonctions, alors qu'il s'agit du paramètre clé dans l'évaluation des politiques optimales.

Un certain nombre d'études de ce type ont donc été conduites, parmi lesquelles on peut citer :

- Nordhaus (1994) avec son modèle Dice, évolution d'un modèle de croissance du type Solow (1956) ;
- Nordhaus (1999) avec le modèle Rice, qui est une extension à plusieurs régions du modèle Dice, sans échange de biens ou de capital entre les régions ;
- Manne et Richels (1995) et le modèle Merge ;



- Tol (2002) et son modèle d'évaluation intégrée Fund ;
- Mendelsohn et al. (1999) et le modèle GIM ;
- Ambrosi et al. (2003) et le modèle Response.

Au-delà de sa prise en compte dans la définition de politiques optimales, on trouve dans Fankhauser et Tol (2005) et Hallegatte (2005b) des analyses détaillées du rôle de la dynamique dans l'évaluation des dommages.

Les résultats de ces études en termes de politiques optimales sont très variés, la plupart proposant une position attentive et aboutissant à des politiques optimales de réduction des émissions peu ambitieuses. Cependant, ces résultats présentent une grande sensibilité à des paramètres très incertains (comme la sensibilité du climat) ou très controversés (par exemple, le taux d'actualisation, qui rapporte les pertes futures aux pertes actuelles<sup>(1)</sup>). Toutefois Ambrosi et al. (2003) ont montré que la prise en compte de l'inertie du système énergétique et de la possibilité d'existence de seuils de température au-delà

(1) Dans le calcul de rentabilité d'un investissement, le taux d'actualisation permet de prendre en compte le fait que la valeur « actuelle » d'un profit décroît quand le moment où le profit est réalisé s'éloigne (on préfère gagner 1 € dans un an que dans un siècle). Pour un investissement privé, on utilise logiquement le taux d'intérêt comme taux d'actualisation. Pour un investissement public, le taux d'actualisation n'a plus de valeur naturelle et utiliser le taux d'intérêt écrase complètement les conséquences à long terme d'une politique. Il existe donc un débat important sur la valeur du taux d'actualisation à appliquer aux problèmes environnementaux de long terme, sans qu'un consensus ne se soit dégagé.



desquels les dommages augmentent rapidement conduit à des réductions d'émissions beaucoup plus précoces, même sans considérer des dommages catastrophiques, et que ce résultat est assez robuste aux autres incertitudes.

Très récemment, des études fondées sur des modèles dynamiques d'équilibre général calculable ont été lancées. Elles visent à étendre les travaux précédents à plusieurs secteurs en équilibre et à faire le lien entre les études ponctuelles détaillées et les études en dynamique (voir par exemple Fischer et al., 2002).

## Conclusions et perspectives

Les points précédents ont montré que nous avons affaire à un problème très particulier, présentant des caractéristiques exceptionnelles :

- c'est un problème global et toute la planète est concernée ;
- les inerties mises en jeu rendent indispensable de penser plusieurs générations en avance et d'anticiper les actions et les dommages ;
- une action réelle de limitation de l'effet de serre met immédiatement en jeu des changements profonds de notre organisation économique et sociale ;
- les dommages potentiels sont quasi infinis, mais l'incertitude reste immense.

Il est clair que les évaluations de dommages décrites plus haut négligent de nombreux mécanismes potentiellement importants et manquent de fondements locaux et d'informations précises sur les impacts futurs. Elles ne doivent

donc être comprises que comme des travaux permettant d'identifier, de décrire et d'évaluer certains processus engendrant des dommages climatiques, et non comme des évaluations crédibles et exhaustives du coût du changement climatique. Pourtant, et bien que leurs auteurs reconnaissent leurs lacunes, les évaluations de dommages sont utilisées et diffusées sans précaution et ont une réelle influence sur le débat public, influence qu'elles ne méritent pas à l'heure actuelle.

Mais, au-delà des difficultés techniques d'évaluation, il existe également un problème conceptuel concernant la capacité même des modèles à décrire les dommages. En effet, tous les modèles utilisés dans les évaluations de dommages sont des modèles de croissance de long terme, qui ignorent les fluctuations de court terme, supposées transitoires, et qui se fondent sur des hypothèses d'équilibre, en se plaçant dans un contexte de croissance dite « en âge d'or » : les marchés sont supposés parfaits et il n'y a ni chômage ni sous-utilisation du capital ; les investissements sont décidés et exécutés de manière optimale ; il y a substitution entre les facteurs (par exemple, travail et capital) et entre les secteurs économiques ; la croissance économique se fait de manière continue et régulière ; l'impact du changement climatique sur l'économie est modélisé sous la forme de diminutions régulières et continues de productivités sectorielles.

Dans un tel cadre, les effets de chocs (événements extrêmes), de court terme (variabilité naturelle et franchissement de seuil), de déséquilibre (choc de ressources), d'inadaptation temporaire et

de transition ne peuvent pas être pris en compte, alors que l'essentiel des impacts passera probablement par de tels processus. Par exemple, les conséquences socio-économiques d'une chute des prix du foncier ou des cours de Bourse de certaines entreprises ne sont pas prises en compte. De plus, de nombreux auteurs (dont Solow, lors de la remise de son prix Nobel en 1988) ont mis en doute l'existence même de l'équilibre représenté par ces modèles et la capacité des modèles de croissance à faire le lien entre les fluctuations de court terme – par exemple, des impacts du changement climatique – et les tendances de long terme qu'ils sont censés reproduire.

Ce lien entre les processus de court terme et les tendances de long terme est aujourd'hui un important point faible de la chaîne de modélisation qui permet d'évaluer les impacts ; il demandera donc d'importantes recherches dans les prochaines années, afin de mieux comprendre les interactions entre l'environnement et nos sociétés. Pour l'heure, il faut être conscient des limitations des études disponibles et ne pas prendre leurs résultats pour des estimations crédibles du risque climatique.

## Remerciements

Je tiens à remercier ici Jean-Charles Hourcade, Philippe Ambrosi et François Gusdorf pour leurs commentaires sur cet article, qui doit beaucoup à leurs propres travaux, les éditeurs de *La Météorologie*, qui m'ont proposé de rédiger cet article, et deux réviseurs anonymes pour leurs remarques et leurs suggestions.

## Bibliographie

- **Alcamo J.**, 1994 : *Image 2.0, Integrated Modeling of Global Climate Change*. J. Kluwer Academic Publishers, Pays-Bas, 314 p.
- **Ambrosi P.**, 2004 : Amplitude et calendrier des politiques de réduction des émissions face aux risques climatiques : leçons des modèles intégrés. Thèse de doctorat, EHESS.
- **Ambrosi P.** et **J.-C. Hourcade**, 2003 : Évaluer les dommages : une tâche impossible ? *Rapport du Conseil d'analyse économique*, n°39, Paris, La Documentation Française, 117–144.
- **Ambrosi P.**, **J.-C. Hourcade**, **S. Hallegatte**, **P. Lecocq**, **P. Dumas** et **M. Ha Duong**, 2003 : Optimal control models and elicitation of attitudes towards climate damages. *Environmental Modeling and Assessment*, 8(3), 133–147.
- **Beniston M.**, 2004 : The 2003 heat wave in Europe: A shape of things to come? An analysis based on Swiss climatological data et model simulations. *Geophysical Research Letters*, 31, L02202.
- **Benson C.** et **E. Clay**, 2004 : *Understanding the economic and financial impact of natural disasters*. The International Bank for Reconstruction and Development. The World Bank, Washington D.C., 152 p.
- **Besancenot J.**, **K. Laaidi** et **M. Laaidi**, 2002 : Mortalité en France selon le contexte thermique : réalité présente et scénarios pour le XXI<sup>e</sup> siècle. Actes du colloque Programme « Gestion et Impacts du changement Climatique ». Séminaire de restitution, Mate et Medias France, Toulouse, 25-26 avril 2002, 81-83.
- **Callaway J. M.**, 2002 : Adaptation benefits and costs, measurement and policy issues, Environment Directorate, Environment Policy Committee, OCDE, Paris, 273-282.
- **Christensen J.** et **O. Christensen**, 2003 : Severe summer flooding in Europe. *Nature*, 421, 805–806.

- **Cline W.**, 1992 : *The Economics of Global Warming*. Institute for International Economics, Washington D.C, 416 p.
  - **Déqué M.**, 2004 : Canicule et simulation numérique (Heat wave and numerical simulation). Project Imfrex. [http://medias.dsi.cnrs.fr/imfrex/web/documents/downloads/md\\_canicule.pdf](http://medias.dsi.cnrs.fr/imfrex/web/documents/downloads/md_canicule.pdf).
  - **Easterling M. G., C. Parmesan, S. Changnon, T. Karl et L. Mearns**, 2000 : Climate extremes: observations, modeling and impacts. *Science*, 298, 2068–2074.
  - **Fankhauser S.**, 1995 : *Valuing climate change: the economics of the greenhouse*. Earthscan, Londres, 176 p.
  - **Fankhauser S., J. B. Smith et R. S. Tol**, 1999 : Weathering climate change: some simple rules to guide adaptation decisions. *Ecological Economics*, 30, 67–78.
  - **Fankhauser S. et R. Tol**, 2005 : On climate change and economic growth. *Resource and Energy Economics*, 27, 1–17.
  - **Fischer G., S. Mahendra et H. Van Velthuizen**, 2002 : *Climate change and Agricultural vulnerability*. IIASA, Luxembourg (Autriche), 160 p.
  - **Hallegatte S.**, 2005a : Accounting for extreme events in the economic assessment of climate change. FEEM Working Paper 01.05.
  - **Hallegatte S.**, 2005b : The long time scales of the climate-economy feedback and the climatic cost of growth, accepté par *Environmental Modeling and Assessment*.
  - **Hallegatte S., P. Ambrosi et J. Hourcade**, 2005 : Using climate analogues for assessing climate change economic impacts. *Soumis à la Climatic Change*.
  - **Hanley N. et C. Spash**, 1993 : *Cost-Benefit Analysis and the Environment*. Edward Elgar, Aldershot, Pays-Bas, 385 p.
  - **Manne A. et R. Richels**, 1995 : The greenhouse debate: Economic efficiency, burden sharing and hedging strategies. *Econ. J.*, 16, 1–37.
  - **Martin E.**, 2002 : Modification de la couverture neigeuse. in *Impacts potentiels du changement climatique en France au XXI<sup>e</sup> siècle*. Mate, Paris, 54–57.
  - **McLeman R. et B. Smit**, 2003 : Changement climatique, migration et sécurité. Commentaire 86, Service Canadien du Renseignement de Sécurité, <http://www.csisscrs.gc.ca/fra/comment/com86.html>.
  - **Mendelsohn R., W. Morrison, M. E. Schlesinger et N. Andronova**, 2000 : Country-specific market impacts of climate change. *Climatic Change*, 45, 553–569.
  - **Mendelsohn R. et J. Neumann**, 1999 : *The Impact of Climate Change on the United States Economy*. Cambridge University Press, Cambridge, 343 p.
  - **Nicholls R., F. Hoozemans et M. Marchand**, 1990 : Increasing flood risk and wetland losses due to global sea-level rise. *Global Environmental Change*, 9 (Special Issue "A new assessment of global effects of climate change"), 69–87.
  - **Nordhaus W.**, 1991 : To slow or not to slow: The economics of the greenhouse effect. *Econ. J.*, 101, 920–937.
  - **Nordhaus W.**, 1994 : *Managing the Global Commons: The Economics of Climate Change*. MIT press, Cambridge, États-Unis, 232 p.
  - **Nordhaus W. et R. Boyer**, 1999 : *Warming the world: economics models of climate change*. MIT Press, Cambridge, États-Unis, 246 p..
  - **NRC**, 2004 : *Valuing Ecosystem Services: Toward Better Environmental Decision-Making*. National Research Council, Committee on Assessing et Valuing the Services of Aquatic and Related Terrestrial Ecosystems, États-Unis, 313 p.
  - **Parmesan C. et G. Yohe**, 2003 : A globally coherent fingerprint of climate change impacts across natural systems. *Nature*, 421, 37–42.
  - **Parry M.**, 2000 : *Assessment of potential effects and adaptations for climate change in Europe: The Europe Acacia project*. Jackson Environmental Institute, University of East Anglia, Norwich, Royaume-Uni, 324 p.
  - **Peck S. et T. Teisberg**, 1994 : Optimal carbon emissions trajectories when damages depend on the rate or level of global warming. *Climatic Change*, 289–314.
  - **Schär C., P. Vidale, C. Frei, C. Haberli, M. Liniger et C. Appenzeller**, 2004 : The role of increasing temperature variability in European summer heatwaves. *Nature*, 427, 332–336.
  - **Seguin B.**, 2002 : Dossier de l'environnement de l'Inra, 22, <http://www.inra.fr/Internet/Produits/dpenv/seguid22.htm>.
  - **Smit B., I. Burton, R. J. Klein et R. Street**, 1999 : The science of adaptation : a framework for assessment. *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change*, 4, 199–213.
  - **Solow R.**, 1956 : A contribution to the theory of economic growth. *The Quarterly Journal of Economics*, 70, 65–94.
  - **Solow R.**, 1988 : Growth theory and after. *The American Economic Review*, 78, 307–318.
  - **Swiss Ré**, 2004 : *Natural catastrophes and man-made disasters in 2003: many fatalities, comparatively moderate insured losses*. Swiss Reinsurance Company, Zurich, Suisse, 44 p.
  - **Thomas C., A. Cameron, R. Green, M. Bakkenes, L. Beaumont, Y. Collingham, B. Erasmus, M. De Siquiera, A. Grainger, L. Hannah, L. Hughes, B. Huntley, A. Van Jaarsveld, G. Midgley, L. Miles, M. Ortega-Huerta, A. Peterson, O. Phillips et S. Williams**, 2004 : Extinction risk from climate change. *Nature*, 427, 145–148.
  - **Tol R.**, 1995 : The damage costs of climate change: Toward more comprehensive calculations. *Environmental and Resource Economics*, 5, 353–374.
  - **Tol R.**, 2002 : New estimates of the damage costs of climate change. Part I: Benchmark estimates. *Environmental and Resource Economics*, 21, 47–73.
  - **Vörösmarty C., P. Green, J. Salisbury et R. Lammers**, 2000 : Global water resources: Vulnerability from climate change and population growth. *Science*, 289, 284–288.
  - **WBGU**, 1997 : Targets for Climate Protection, 1997: A study for the third Conference of the Parties to the Framework Convention on Climate Change in Kyoto. WBGU (Wissenschaftlicher Beirat der Bundesregierung globale Umwelt Veränderungen), Bremerhaven, Allemagne, 36 p.
  - **Weller G. et M. Lange**, 1999 : Impacts of global change in the Arctic regions. International arctic science committee, Centre for global change and arctic system research, University of Alaska, Fairbanks, 59 p.
-