Sous la direction de
Hervé Le Treut
Jean-Pascal van Ypersele
Stéphane Hallegatte
Jean-Charles Hourcade

Edition
Claire Weill

Science du changement climatique
Acquis et controverses

Auteurs

Shardul Agrawala
Docteur de l'université de Princeton, Shardul Agrawala étudie les questions de politique climatique à la direction de l'environnement de l'OCDE. Il travaillait auparavant sur l'évaluation des changements climatiques à Columbia University et à l'IIASA. Il est l'auteur principal du chapitre sur l'évaluation des pratiques d'adaptation du futur quatrième rapport d'évaluation du GIEC.

Stéphane Hallegatte
Chercheur à Météo-France, Stéphane Hallegatte est doctorant en économie de l'environnement au Cired. Ses thèmes de recherche portent sur les processus de rétroaction de vapeur d'eau sur le changement climatique et les interactions entre les aspects physiques et économiques du changement climatique.

Jean-Charles Hourcade
Directeur de recherche au CNRS et directeur d'étude à l'Ecole des hautes études en sciences sociales, Jean-Charles Hourcade est, depuis 1987, directeur du Centre international de recherche sur l'environnement et le développement (Cired). Il a contribué, en tant qu'auteur principal, au deuxième et au troisième rapport d'évaluation du GIEC.

Hervé Le Treut
Physicien et ancien élève de l'Ecole normale supérieure de Paris, Hervé Le Treut est directeur de recherche au CNRS.
Il dirige le Laboratoire de météorologie dynamique et enseigne à l'Ecole polytechnique.
Il fait partie des principaux rédacteurs des rapports du groupe 1 du GIEC.

Annett Moehner
Diplômée d'études politiques et environnementales de l'université de Greifswald (Allemagne) et de l'université de Bâton Rouge (Etats-Unis), Annett Moehner est titulaire d'une bourse Bosch en affaires internationales. Elle a travaillé à la direction de l'environnement de l'OCDE sur les politiques climatiques. Elle a rejoint récemment la coopération technique allemande (GTZ) à Delhi (Inde).

Jean-Pascal van Ypersele
Professeur à l'université catholique de Louvain (Belgique) et membre de l'Institut d'astronomie et de géophysique Georges Lemaître, Jean-Pascal van Ypersele est physicien et climatologue.
Ses recherches sur la modélisation du climat, tentent de contribuer à une approche intégrée de la non-durabilité de notre civilisation.
Il est membre du Bureau du GIEC et a été l'un des auteurs du troisième rapport d'évaluation (groupe 2).

Editeur

Claire Weill
Claire Weill est physicienne et ancienne élève de l'Ecole normale supérieure de Paris.
Après quinze ans consacrés à la recherche et à l'enseignement de la physique de la matière condensée, elle a rejoint la Mission interministérielle de l'effet de serre en 1999.
Depuis 2002, elle est responsable du thème risques et précaution au sein de l'Iddri.

Ont participé à la rédaction

Philippe Ambrosi
Cired (France)

Richard Baron
Iddri (France)

Catherine Boemare
Cired (France)

Sandrine Bony
CNRS, Laboratoire de météorologie dynamique (France)

Marc Bied-Charreton
Comité scientifique français de la désertification

Michel Colombier
Iddri (France)

Michel Déqué
Centre national de recherches météorologiques (France)

Pierre Friedlingstein
CNRS, Laboratoire des sciences du climat et de l'environnement (France)

Frédéric Ghersi
CNRS (France)

Michael Ghil
Ecole normale supérieure de Paris (France)

Jean Jouzel
Institut Pierre-Simon Laplace (France)

Michel Petit
Société météorologique de France

Michel Petit
Institut agronomique méditerranéen de Montpellier (France)

Pierre Picard
Université Paris X (France)

John Robinson
Université de Colombie britannique (Canada)

Jayant Sathaye
International Energy Studies Group, US Department of Energy (Etats-Unis)

Les propos contenus dans cet ouvrage n'engagent que leurs auteurs et non leurs institutions.

Photo de couverture : Icebergs et manchots. Remerciements à Yann Arthus-Bertrand.
Lire la légende en page 3 de couverture. © Yann Arthus-Bertrand, « Earth from above ».

© Iddri, 2004

Diffusion : Iddri – 6, rue du Général Clergerie, 75116 Paris.
www.iddri.org
Conception graphique : Alain Chevallier. Impression : Offset 2000.

Science du changement climatique

Acquis et controverses

Sous la direction de
Hervé Le Treut
Jean-Pascal van Ypersele
Stéphane Hallegatte
Jean-Charles Hourcade

Edition
Claire Weill

Sommaire

Préface 5
Jean Jouzel

Introduction 7
Richard Baron, Michel Colombier et Claire Weill

chapitre 1 **La base scientifique** 11
Hervé Le Treut

Quels facteurs peuvent influer sur le changement climatique ? 11
Le climat est-il en train de changer ? 15
Les perspectives pour le XXIe siècle 18
L'après-XXIe siècle 22
Un changement climatique fortement hétérogène 25
L'échelle régionale 26
Conclusion 28

La variabilité climatique, le réchauffement anthropique et le processus du GIEC 30
Michael Ghil

La modélisation : un outil central dans l'expertise du GIEC 32
Hervé Le Treut

La description des incertitudes 34
Michel Petit

Comment le débat scientifique a fait progresser l'expertise sur les rétroactions atmosphériques 37
Sandrine Bony

Incertitude de l'amplitude du changement climatique liée aux rétroactions entre le climat et le cycle du carbone 39
Pierre Friedlingstein

chapitre 2 **Impacts, adaptation et vulnérabilité** 41
Jean-Pascal van Ypersele, Stéphane Hallegatte, Shardul Agrawala et Annett Moehner
Les impacts des changements climatiques 42
Des motifs de préoccupation 47
L'évaluation des dommages et les implications pour la décision 51
Adaptation et développement durable 57
Conclusion 60

Quelques réflexions sur la gestion du risque climatique 62
Pierre Picard
Les impacts des changements climatiques sur le continent africain 64
Marc Bied-Charreton
Les impacts des changements climatiques en France 67
Michel Déqué
***A few*, ou comment affaiblir un texte du GIEC** 70
Jean-Pascal van Ypersele
Evaluer les dommages. Des coûts directs aux répercussions socio-économiques, les limites d'une approche statique énumérative 73
Jean-Charles Hourcade, Philippe Ambrosi
Impact des changements climatiques sur les ressources en eau au Maghreb. Conséquences possibles sur l'équilibre de la région méditerranéenne 75
Michel Petit

chapitre 3 **Mesures de réduction des émissions** 77
Jean-Charles Hourcade
Les incertitudes sur les émissions de long terme 77
Les coûts du protocole de Kyoto 81
L'objectif de la convention climat, un défi impossible ? 89
Conclusion 92

Quelques commentaires sur les coûts de l'observance du protocole de Kyoto 94
John Robinson
Potentiels et coûts de réduction des émissions de gaz à effet de serre. Evaluation des options technologiques 97
Jayant Sathaye
Entre « pire des cas » et illusoire gratuité. Quelques ordres de grandeur 100
Frédéric Ghersi, Jean-Charles Hourcade

Références bibliographiques 102

Préface

Jean Jouzel

Directeur de recherches au Commissariat à l'énergie atomique, Jean Jouzel est spécialiste des climats du passé. Depuis 2001, il dirige l'Institut Pierre-Simon Laplace (IPSL). Il a été auteur principal du deuxième et du troisième rapport du GIEC. Il est membre du bureau du GIEC et vice-président de son comité scientifique.

Même si les incertitudes sur l'ampleur du changement climatique à venir sont très importantes, la communauté scientifique étudiant le climat de notre planète affirme de façon quasi unanime que la température moyenne à la surface de la terre va augmenter de façon significative d'ici la fin du siècle, avec toute une série de conséquences, dont certaines de grande ampleur. On peut être sceptique au regard de cette affirmation qui place le réchauffement climatique au centre des préoccupations environnementales auxquelles nous aurons à faire face au cours des prochaines décennies ou bien convaincu par les arguments apportés par cette communauté. Il n'en reste pas moins que les chances qu'un habitant de notre pays échappe complètement à ce débat, désormais présent dans de nombreux médias, sont de plus en plus faibles. Ne serait-ce que parce que le Plan Climat qui, en principe, devrait permettre à la France de respecter les engagements du protocole de Kyoto, sera là pour nous rappeler que la maîtrise des émissions des gaz à effet de serre passe par une action collective qui, au-delà des décideurs politiques et des différentes branches de l'activité économique, implique également le citoyen.

Dans ce contexte, il est crucial que tous ceux qui le souhaitent puissent avoir facilement accès aux éléments sur lesquels se sont fondés les dirigeants politiques pour ratifier, dès 1992, la Convention cadre des Nations unies sur les changements climatiques. L'objectif ultime de cette convention est de « stabiliser les concentrations des gaz à effet de serre à un niveau qui empêche toute perturbation anthropique dangereuse du système climatique. Il conviendra d'atteindre ce niveau dans un délai convenable pour que les écosystèmes puissent s'adapter naturellement aux changements climatiques, que la production alimentaire ne soit pas menacée et que le développement climatique puisse se

poursuivre d'une manière durable ». Le protocole signé à Kyoto en 1997 ne constitue qu'un tout premier pas vers cet objectif ; d'autant que les chances sont faibles que l'ensemble des pays signataires le ratifient. A titre d'exemple, il se traduira par le fait que, entre 2008 et 2012, la France ne devra pas, en termes d'équivalent carbone annuel, émettre plus de gaz à effet de serre qu'en 1990.

En matière de climat, les décisions prises par les politiques s'appuient sur le diagnostic établi par le GIEC, le Groupe intergouvernemental d'experts sur l'évolution du climat, mis sur pied en 1988 sous l'égide des Nations unies, à travers son programme Environnement, et de l'Organisation météorologique mondiale. Trois volumineux rapports, couvrant les aspects scientifiques, ceux liés aux impacts, à l'adaptation et à la vulnérabilité et ceux concernant les mesures à prendre pour maîtriser l'effet de serre, ont été publiés en 1990, 1995 et 2001. Ils sont complétés par deux résumés, l'un long dit « technique » et l'autre court destiné aux décideurs, ainsi que d'un rapport de synthèse rédigé sous forme de questions-réponses et de son résumé. Même si le GIEC a récemment fait l'effort de publier ces résumés en français et de les mettre à disposition sur son site Internet, leur lecture reste assez rébarbative. Elle peut également laisser un sentiment de frustration au lecteur qui n'aurait pas d'interlocuteur dans le domaine, les conclusions présentées ouvrant sur de nombreuses questions.

Conscient de ce décalage entre le document existant et les aspirations d'un public plus large, l'Institut du développement durable et des relations internationales nous offre une lecture commentée du troisième rapport du GIEC. Celle-ci s'appuie sur un ensemble d'articles et de points de vue, rédigés par des scientifiques avec le souci d'examiner, pour chacun des thèmes abordés, les controverses qui jalonnent le rapport. Ces controverses méritent que l'on s'y attarde car l'objectif de notre communauté scientifique est de convaincre de la qualité des diagnostics apportés, qu'ils concernent les certitudes des scientifiques ou qu'ils fassent une place, tout aussi justifiée, aux incertitudes qui subsistent. En ce sens, l'éclairage apporté par cet ouvrage est extrêmement enrichissant. Il en rend indéniablement la lecture moins aride que celle du rapport initial.

Cette réflexion, conduite par des chercheurs qui pour beaucoup seront impliqués comme auteurs principaux dans la rédaction du quatrième rapport du GIEC à paraître en 2007, est aussi riche de promesses. En effet, l'approche adoptée ici, fondée sur un examen critique des multiples facettes d'un problème dont la complexité est le maître mot, est aussi celle qui garantit l'objectivité et la qualité des travaux du GIEC.

Espérons que les décideurs politiques s'appuieront sur ces travaux pour engager une véritable stratégie de maîtrise des émissions des gaz à effet de serre qui conduise vers une stabilisation des concentrations de ces gaz à un niveau le plus proche possible de celui que nous connaissons actuellement.

Introduction

Richard Baron, Michel Colombier et Claire Weill

En 2001, le Groupe intergouvernemental d'experts sur l'évolution du climat (GIEC) a délivré, dans son troisième rapport d'évaluation[1] un diagnostic unanime : les émissions de gaz à effet de serre (GES) et d'aérosols dues aux activités humaines qui modifient la composition de l'atmosphère entraînent d'ores et déjà des changements dans le système climatique. Les effets de la hausse des températures causée par les activités humaines sur les systèmes biologiques sont sensibles. Dans toutes les projections fondées sur des scénarios d'émission élaborés par le GIEC, la température moyenne globale et le niveau moyen de la mer devraient s'élever, avec des effets très préoccupants sur les écosystèmes et les activités humaines.

Ce rapport fait suite aux deux premiers rapports d'évaluation des changements climatiques publiés en 1990 et 1995. Il regroupe les contributions de trois groupes de travail, qui ont étudié les questions suivantes :

– « La base scientifique du changement climatique » *(The Scientific Basis)*, pour le groupe 1 ;

– « Impacts, adaptation et vulnérabilité » *(Impacts, Adaptation, and Vulnerability)*, pour le groupe 2 ;

– « Mesures de réduction des émissions » *(Mitigation)*, pour le groupe 3.

Le premier rapport d'évaluation du GIEC, paru deux ans avant le Sommet de la Terre de Rio de 1992, a constitué la première traduction en termes d'expertise internationale du signal d'alerte lancé par la communauté scientifique sur ce sujet. Ce signal reposait sur des données indiscutables mettant en évidence la croissance dans l'atmosphère de la concentration en dioxyde de carbone et autres gaz à effet de serre (GES) comme le méthane, depuis le début de l'ère industrielle. Il est alors apparu nécessaire d'évaluer l'importance des conséquences de ces modifications atmosphériques d'origine humaine et de créer une structure chargée d'organiser l'expertise à l'échelon international, sous la double

1. Dénommé dans la suite de l'ouvrage TAR, pour Third Assessment Report.

tutelle de l'Organisation météorologique mondiale et du Programme des Nations unies pour l'environnement (lire encadré).

L'élaboration du deuxième rapport a débuté après l'adoption de la Convention cadre des Nations unies sur les changements climatiques à Rio. La demande formulée au GIEC était triple. Les experts devaient évaluer si les connaissances scientifiques confirmaient l'alerte d'un risque de changements climatiques liés aux activités humaines. Ils devaient étudier les impacts de ces changements éventuels, tout comme leurs conséquences socio-économiques, et analyser les mesures d'atténuation des changements climatiques visant à réduire les émissions des gaz à effet de serre.

Les objectifs du troisième rapport ont été fixés dans le contexte de négociations intenses pour la rédaction du protocole de Kyoto — le Mandat de Berlin (1995) stipulant que le processus de négociation devait s'appuyer entre autres sur les travaux du GIEC. Le groupe 1 devait ainsi préciser quels pouvaient être le réchauffement à attendre des scénarios d'émissions possibles fournis par un rapport spécial du GIEC, le Special Report on Emissions Scenarios (SRES), publié en 2000. Le groupe 2 devait approfondir la question des impacts et de la vulnérabilité et aborder les questions d'adaptation — qui commencent à être liées aux objectifs de développement durable et d'équité. S'éloignant de l'aspect strictement économique du deuxième rapport, le groupe 3 a embrassé les aspects scientifiques, technologiques et socio-économiques des mesures de réduction des émissions. Au centre de ses travaux, l'évaluation des coûts du respect des objectifs de réduction des émissions de gaz à effet de serre a tenté de répondre à la demande formulée par les gouvernements et les acteurs économiques. Le protocole de Kyoto, signé en 1997, marque ainsi les travaux du troisième rapport, publié en 2001.

Depuis la création du GIEC, les trois groupes de travail possèdent leur identité propre en termes de disciplines convoquées, et donc de compétences, et d'objectifs fixés. Alors que chaque groupe devrait pouvoir s'appuyer sur les travaux des deux autres, la durée d'élaboration des rapports ne rend pas aisée une telle coordination. En outre, les trois groupes rencontrent des difficultés de nature bien différente. Pour le groupe 1, il s'agit de progresser à la fois dans la compréhension des phénomènes physiques qui gouvernent les changements climatiques et dans la capacité à modéliser ces changements à travers des projections globales, régionales, voire continentales. Pour le groupe 2, la route est encore longue pour parvenir à dresser un paysage des impacts des changements climatiques à des

Qu'est-ce que le GIEC ?

Le Groupe intergouvernemental d'experts sur l'évolution du climat (GIEC) a été créé en 1988. Il est placé sous la double tutelle de l'Organisation météorologique mondiale et du Programme des Nations unies pour l'environnement. Mais il n'a rien d'une grande structure onusienne. Il s'appuie sur un secrétariat restreint, dont la tâche est de mettre en place les conditions nécessaires à la production de l'expertise internationale sur tous les aspects du changement climatique. L'activité du GIEC se distingue à la fois de la recherche et du processus de négociation multilatéral. Les experts du GIEC sont des scientifiques du monde entier, qui rassemblent, analysent et synthétisent l'ensemble des travaux de recherche publiés dans leur domaine. Les questions à traiter sont décidées lors de réunions plénières du GIEC. Des rapports d'évaluation et de synthèse sont publiés tous les cinq ans.

Par ailleurs, à la demande de l'instance de négociation, la Convention cadre des Nations unies sur les changements climatiques, le GIEC produit également des rapports spéciaux, comme celui sur les scénarios d'émission (SRES) ou encore celui sur l'utilisation des sols et de la forêt, publiés en 2000.

Le GIEC fait ainsi progresser la recherche et constitue le cadre approprié pour instruire les controverses scientifiques. En effet, ses travaux sont fondés sur des recherches ayant fait l'objet d'une revue effectuée par des scientifiques avant publication. Le GIEC doit également produire deux types de résumés de chacun de ses rapports d'évaluation, un résumé technique et un résumé à l'intention des décideurs. Ce dernier, d'une vingtaine de pages, le plus connu car le plus concis, est approuvé mot à mot en présence des représentants des gouvernements et des scientifiques auteurs du rapport.

échelles pertinentes et en utilisant des modes de représentation respectant les diversités profondes entre les sociétés. Le groupe 3 a pour mission d'identifier et d'évaluer les politiques et mesures susceptibles d'enclencher puis d'accompagner les transformations sociales nécessaires pour combattre les changements climatiques, dans un objectif d'équité intra et intergénérationnel. Toutefois, certaines questions concernent les trois groupes, comme les incertitudes ou encore le lien entre les changements climatiques et le développement durable.

Si la littérature traitant du changement climatique sous tous leurs aspects est foisonnante, elle fait état, pour nombre de questions traitées, d'incertitudes importantes, qui caractérisent le statut des connaissances scientifiques à un moment donné et illustrent la complexité des questions. En outre, pour de nombreux sujets, l'interprétation des données d'observation, des résultats d'analyses et de modèles fait l'objet de controverses scientifiques, par exemple celle sur le rôle des nuages et de la vapeur d'eau dans les rétroactions atmosphériques. Lors de leur parution, les rapports d'évaluation donnent lieu à des débats très intenses en dehors de la communauté scientifique, qui reposent essentiellement sur l'information contenue dans les résumés à l'intention des décideurs. La rédaction des résumés allie la recherche de consensus au souci de concision. Elle ne peut donc pas facilement rendre compte de la matière constituant le corps du rapport, qui comprend le détail des observations, l'explicitation des divers types d'incertitude et l'analyse des différentes controverses scientifiques.

Dans quel contexte nous situons-nous aujourd'hui, alors que l'élaboration du quatrième rapport du GIEC a débuté ? La période est marquée par la décision des Etats-Unis de se retirer du protocole de Kyoto, et donc de se désengager de l'effort international de réduction des émissions de GES. Dans le même temps continuent d'apparaître çà et là des publications qui remettent en cause les résultats du troisième rapport, semant la confusion dans le public, parmi les décideurs politiques, voire même des scientifiques non spécialistes des questions climatiques. Dans le doute, les politiques seraient dans l'incapacité de prendre des décisions. Ainsi, les incertitudes émaillant le paysage des connaissances scientifiques sont trop souvent utilisées à des fins stratégiques, ce qui contribue à bloquer le processus international. Or, la présence d'incertitudes et de controverses scientifiques n'empêche pas de prendre des décisions scientifiquement fondées.

Pour l'ensemble des raisons évoquées ci-dessus, il nous apparaît nécessaire de revenir sur le troisième rapport du GIEC, non pour en réaliser une nouvelle synthèse, mais dans le but de faire apparaître les points importants du débat. Il nous semble en effet important d'apprécier le statut des controverses au regard des décisions qui doivent être prises aujourd'hui.

En premier lieu, il faut prendre la mesure des différentes inerties en présence. On connaît celles qui caractérisent le système climatique : le dioxyde de carbone émis aujourd'hui sera présent dans l'atmosphère au moins durant cent ans ; et les réponses aux forçages anthropiques peuvent se manifester sur des échelles de temps encore plus longues. Mais on sous-estime souvent l'inertie des dynamiques d'émission, conséquence de celles des systèmes socio-économiques : certaines décisions prises aujourd'hui détermineront pour plusieurs dizaines d'années les émissions de secteurs d'activité comme les transports. En outre, il faut prendre en compte la lenteur des processus de transformation et de diffusion des nouvelles techniques moins émettrices de gaz à effet de serre. Plus précisément, il apparaît légitime car scientifiquement fondé de prendre certaines décisions aujourd'hui. Mais ceci ne signifie pas nécessairement qu'il faille faire tout, tout de suite. Dans le cas des infrastructures qui ne peuvent être modifiées que très progressivement (réseaux ferroviaires,

grandes agglomérations, réseaux de distribution de l'énergie...), il s'agit plutôt de prendre dès à présent des mesures qui nous situent sur des chemins acceptables face aux risques climatiques. En revanche, ne pas anticiper les effets des politiques actuelles revient à s'enfermer dans des trajectoires d'émissions élevées.

Dans cette perspective marquée par les temps longs, pour les effets des changements climatiques comme pour leurs causes, les controverses scientifiques n'ont pas toutes le même statut. Certaines n'empêchent pas d'orienter d'ores et déjà l'action parmi différents choix possibles. D'autres, peu ou pas discriminantes pour les décisions d'aujourd'hui, partagent avec les précédentes le rôle plus traditionnel de faire progresser la connaissance scientifique.

Par exemple, les projections pour le réchauffement moyen global à l'horizon 2100, réalisées à partir des différents scénarios ou trajectoires d'émissions, présentent des incertitudes de l'ordre de 100 %. Pourtant, ces incertitudes ne doivent pas conduire à l'inaction : ainsi, des scénarios d'émissions, élevées conduisent à un réchauffement moyen global compris entre 3 °C et 5,8 °C, mais, dans le même temps, les éléments scientifiques disponibles indiquent que de telles amplitudes de réchauffement seraient catastrophiques (lire chapitre 1, p. 21 et chapitre 2, pp. 48 à 51). Les travaux du groupe 1 montrent également que les trajectoires conduisant à un tel réchauffement et celles associées à un réchauffement inférieur, compris entre 1,4 °C et 3 °C, ne se recouvrent pas. Il est encore possible de choisir de se placer sur une trajectoire évitant des changements climatiques inacceptables. La question est alors de préciser les facteurs sur lesquels il nous faut agir aujourd'hui pour, *a minima*, ne pas nous retrouver sur une trajectoire d'émissions associée à l'un des scénarios interdits.

En revanche, si nous devions élaborer un choix de politique climatique fondé sur l'élévation du niveau des mers à l'horizon 2100, nous ne serions pas en mesure de définir les efforts de réduction nécessaires, les incertitudes se recouvrant quasi totalement pour l'ensemble des scénarios. En réalité, les phénomènes mis en jeu ont des dynamiques beaucoup plus lentes que la centaine d'années et, par conséquent, une analyse pertinente nécessite des projections sur des durées beaucoup plus longues (chapitre 1, pp. 18 à 25).

Enfin, la controverse sur la possibilité d'un réchauffement climatique lié à l'activité humaine, présente lors de la rédaction du premier rapport du GIEC, s'est conclue par la certitude d'un réchauffement anthropique futur.

Afin de rendre compte d'une pluralité de points de vue, l'Iddri a sollicité des scientifiques d'origines, de disciplines et d'objets d'étude variés. Ils ont pu rendre compte de leur expérience au sein du GIEC, s'exprimer sur tel ou tel aspect du troisième rapport, parfois assez technique (potentiels et coûts de réduction des émissions de gaz à effet de serre) ou présenter l'état d'une controverse (rôle joué par les nuages et la vapeur d'eau dans le changement climatique).

L'ouvrage est constitué de trois chapitres traitant respectivement des travaux des groupes 1, 2 et 3 du GIEC. Chaque chapitre s'articule autour d'un commentaire du rapport du groupe considéré, rédigé sous la responsabilité d'un expert scientifique ayant contribué à l'élaboration de ce rapport. Il est illustré par des extraits du rapport sous forme de figures, de tableaux ou de textes. Par ailleurs, il est complété par des contributions d'auteurs, sur lesquelles s'appuie le corps du texte, mais qui peuvent être lues de manière indépendante.

Hervé Le Treut est le responsable scientifique du chapitre 1, « La base scientifique » ; Jean-Pascal van Ypersele, celui du chapitre 2, « Impacts, adaptation et vulnérabilité » et Jean-Charles Hourcade, celui du chapitre 3, « Mesures de réduction des émissions ».

La base scientifique

Hervé Le Treut

Le troisième rapport du GIEC (TAR) est parvenu à attirer l'attention de l'opinion publique en grande partie grâce à la qualité de certaines figures, qui rassemblent et traduisent clairement l'information souvent diffuse contenue dans les travaux scientifiques spécialisés. Ces figures, qui concentrent souvent de nombreux résultats, ont presque toujours fait l'objet d'un travail d'élaboration important et progressif. Elles possèdent un pouvoir visuel qui permet de livrer un message rapidement, ce qui explique que certaines d'entre elles aient été très médiatisées. Or, le mode de présentation graphique utilisé dans le rapport, tout comme la rédaction des résumés auquel il est intimement lié, relèvent de choix sur lesquels il nous a paru important de nous attarder.

C'est pourquoi nous avons choisi de présenter synthétiquement le rapport du groupe 1 en analysant une dizaine de figures et en commentant l'information transmise au lecteur à partir de quelques questions clés. Cette approche permet à la fois de rester fidèle au rapport, au moins aux parties que résument les figures choisies[1], et de présenter un peu plus librement la signification des résultats illustrés.

Quels facteurs peuvent influer sur le changement climatique ?

Les changements climatiques sont dus à la fois à la variabilité interne du climat et à des facteurs extérieurs, naturels et d'origine anthropique. La modification de ces facteurs, par exemple la concentration en vapeur d'eau, en dioxyde de carbone ou en méthane dans l'atmosphère, perturbe le bilan des rayonnements émis ou reçus par la planète. Cette perturbation est appelée forçage radiatif. Il s'agit d'une quantité calculée avant que le climat ne s'ajuste pour rétablir un nouvel état d'équilibre (seule la stratosphère[2] est censée s'ajuster instantanément).

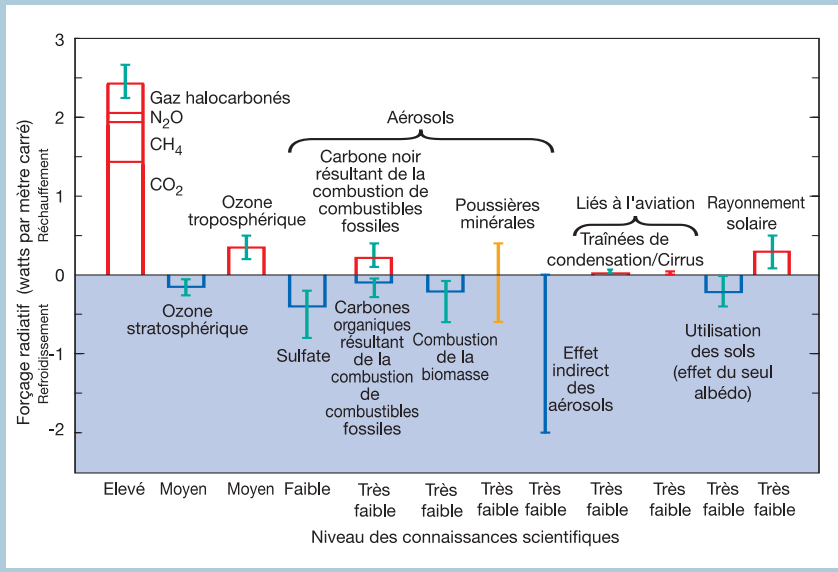
1. Les légendes des figures peuvent avoir subi des modifications par rapport au texte original, par souci de simplification. Elles n'ont donc pas strictement le statut d'extraits du rapport ou de ses résumés.

2. La stratosphère est la région fortement stratifiée de l'atmosphère située au-dessus de la troposphère qui s'étend d'environ 10 km (en moyenne, de 9 km sous les hautes latitudes à 16 km dans les tropiques) à 50 km d'altitude.

3e RAPPORT DU GIEC EXTRAIT

FIGURE 1.1

Forçage radiatif moyen global du système climatique en 2000 par rapport à 1750



La figure 1.1 présente la variation de forçage radiatif de 1750 à 2000 de différents agents : gaz à effet de serre, aérosols, aviation, rayonnement solaire et utilisation des terres (les effets des éruptions volcaniques ne sont pas représentés). Les données sont des moyennes annuelles pour l'ensemble de la planète de la différence entre l'impact radiatif de ces agents à la fin du XXe siècle (année 2000) et leur impact dans des conditions préindustrielles. L'échelle horizontale rend compte de l'évaluation par les scientifiques de leur niveau de compréhension des phénomènes qui produisent les forçages. Les incertitudes plus usuellement rencontrées liées à la dispersion des résultats publiés sont représentées par des barres verticales.

Sources

IPCC, 2001, p. 392 (fig. 6.6) ;
GIEC, 2002, Résumé à l'intention des décideurs, p. 9 (fig. 3) ;
GIEC, 2002, Résumé technique, p. 35 (fig. 9).

Outre la quantification de l'impact radiatif des principaux agents du changement climatique, anthropiques ou non, un effort important a été fait pour définir et estimer les incertitudes relatives au forçage, d'une part en indiquant la dispersion des résultats publiés (barres verticales), d'autre part en proposant une estimation qualitative, plus intuitive, du degré de compréhension actuel des phénomènes qui produisent les forçages (échelle horizontale). En effet, ces phénomènes sont plus ou moins bien compris. La figure 1.1 est par conséquent extrêmement élaborée, car elle rassemble à la fois de nombreux résultats pour des agents de forçage très différents ainsi que deux types d'estimation des données rassemblées.

Le forçage radiatif permet de comparer des perturbations d'origine variée. Les agents de forçage présents sur la figure 1.1 diffèrent par leur forme, leur nature et leur répartition spatiale. Certains gaz à effet de serre sont émis directement dans l'atmosphère, d'autres sont des produits chimiques résultant d'autres émissions. La plupart de ces gaz ont une origine à la fois naturelle et anthropique. Enfin, le forçage causé par ces divers agents peut être positif — c'est-à-dire contribuer au réchauffement de la surface de la terre — ou bien négatif — c'est-à-dire contribuer au refroidissement de la surface de la terre.

Le réchauffement est presque toujours le résultat d'une diminution du rayonnement terrestre qui s'échappe vers l'espace (effet de serre), alors que le refroidissement est lié à une réflexion accrue du rayonnement solaire.

Les données présentées ici donnent une image nécessairement simplifiée, et donc trompeuse, du forçage radiatif. En effet, certains forçages mentionnés présentent des variations spatiales et interannuelles importantes, dont les moyennes globales annuelles ne rendent pas compte. Les forçages globaux moyens, positifs et négatifs, ne peuvent donc ni toujours être additionnés, ni être considérés *a priori* comme fournissant des effets se compensant les uns les autres en termes d'impact sur le climat mondial.

Les gaz à effet de serre et les aérosols

Les gaz à effet de serre et les aérosols peuvent être répertoriés en fonction de leur durée de vie dans l'atmosphère.

Les gaz séjournant longtemps dans l'atmosphère s'y mélangent de façon homogène ; leur effet est donc indépendant de la localisation de leur source d'émission. Cette durée de séjour peut être définie comme le temps que mettrait la composition atmosphérique pour revenir à un équilibre si les émissions gazeuses cessaient. Elle est de l'ordre du siècle pour le dioxyde de carbone (CO_2) ou l'oxyde nitreux (N_2O), de la décennie pour le méthane (CH_4) et elle s'inscrit dans une fourchette large allant de 50 ans à plus de 50 000 ans pour les hydrocarbures halogénés comme les CFC, HFC, ou perfluorés (CF_4, PFC, C_2F_6, CF_6). Ces derniers ont des durées de vie dans l'atmosphère extrêmement longues et sont d'excellents absorbants du rayonnement infrarouge. Ils peuvent donc, même en quantité minime, avoir une influence durable sur le climat.

Tous les gaz que nous venons de citer ont un forçage radiatif positif ; la part la plus importante est due au CO_2 (voir figure 1.1) ; ce forçage dépend à la fois des propriétés radiatives des molécules de ces gaz, de l'augmentation de leur concentration dans l'atmosphère et de leur temps de séjour atmosphérique après émission.

L'ozone (O_3), stratosphérique et troposphérique[3], n'est pas émis directement, mais se forme à partir de processus photochimiques (dans la stratosphère) ou chimiques (dans la troposphère) faisant intervenir des gaz précurseurs ou des catalyseurs d'origine naturelle et humaine. Son temps de séjour dans l'atmosphère est au maximum de quelques mois, ce qui produit une évolution géographique très contrastée. L'appauvrissement de la couche d'ozone stratosphérique s'est traduit par un forçage négatif. Une reconstitution de la couche d'ozone dans les prochaines décennies pourrait inverser le signe de ce forçage. L'évolution future de l'ozone troposphérique sera conditionnée par l'importance des émissions de CH_4 et de polluants. Son temps de séjour dans l'atmosphère est suffisamment faible pour conduire à des variations régionales importantes : sa concentration augmente plus vite au-dessus de certaines régions (Asie) que d'autres (Amérique du Nord, Europe). Son forçage radiatif moyen global ($0{,}35 \pm 0{,}2$ W/m²) est actuellement le troisième par ordre d'importance derrière celui du CO_2 (1,46 W/m²), puis du CH_4 (0,48 W/m²).

Les aérosols[4] séjournent brièvement dans l'atmosphère et proviennent de sources réparties de façon hétérogène à la surface de la terre. Leur concentration est donc maximale près des lieux d'émission. L'émission peut être naturelle (tempête de poussière, éruption volcanique) ou anthropique (combustion de produits fossiles ou de biomasse). Le forçage des aérosols dépend de la répartition de ces derniers dans l'espace, de leur taille, de la forme et de la composition chimique des particules qui les constituent, ainsi que de divers aspects du cycle hydrologique. Les aérosols ont une influence importante sur le bilan radiatif du système terre-atmosphère : un effet radiatif direct est la diffusion et l'absorption du rayonnement solaire et du rayonnement thermique infrarouge ; un effet indirect est associé à la modification des propriétés microphysiques, et donc radiatives, des nuages, ainsi qu'à leur abondance. La figure 1.1 présente une évaluation quantitative des forçages directs, dont l'amplitude et le signe varient selon le type d'aérosol. Le signe est souvent négatif, mais il ne s'agit pas d'une règle générale : la suie ou certains aérosols carbonés, associés à la combustion des combustibles fossiles ou à la déforestation, absorbent fortement le rayonnement infrarouge et produisent un effet de serre.

3. La troposphère est la partie basse de l'atmosphère, située entre la surface de la terre et environ 10 km d'altitude aux latitudes moyennes (de 9 km aux latitudes hautes à 16 km sous les tropiques en moyenne), où se forment les nuages et les autres phénomènes météorologiques. Dans la troposphère la température décroît généralement avec l'altitude.

4. Les aérosols sont des agrégats de particules solides ou liquides formés dans l'air, de taille comprise entre 0,01 et 10 millionièmes de mètre ou micron. Les aérosols séjournent dans l'atmosphère au moins plusieurs heures. Ils peuvent être d'origine naturelle ou anthropique. Ils peuvent influencer le climat de deux façons : directement en diffusant et en absorbant des radiations ; indirectement en agissant comme des noyaux de condensation pour la formation de nuages ou en modifiant les propriétés optiques et la durée de vie des nuages. Le terme d'aérosol a aussi été utilisé de manière impropre pour désigner le combustible contenu dans les vaporisateurs ou « bombes aérosol ».

Les modifications de l'usage des sols

Les modifications de l'usage des sols (érosion, déforestation) augmentent généralement le pouvoir réfléchissant du sol, encore appelé albedo. Ceci limite le rayonnement infrarouge émis par le sol d'où un forçage radiatif négatif.

Les avions

Les avions affectent aussi la composition chimique de l'atmosphère, par exemple en rejetant des oxydes d'azote. Ils peuvent aussi injecter de la vapeur d'eau dans la stratosphère. Alors que le cycle de l'eau dans la troposphère est trop rapide (une à deux semaines) pour être affecté directement par les activités humaines, l'injection d'eau dans la stratosphère, où son temps de séjour est de quelques années, peut au contraire contribuer directement à l'effet de serre.

Le rayonnement solaire

Depuis le début du siècle, la mesure de la constante solaire[5] reste indirecte et donc incertaine. L'ordre de grandeur des modifications qu'elle a subies reste dans tous les cas inférieur en termes de forçage direct à celui des gaz à effet de serre. Certains arguent que le réchauffement récent du climat résulte davantage de variations solaires que des gaz à effet de serre. Etayer cette hypothèse nécessite d'identifier des mécanismes d'amplification. Des candidats possibles sont : la variation de la composition du rayonnement solaire (la distribution d'amplitude en fonction des différentes longueurs d'onde présentes), appelée variation spectrale, qui accompagne un changement d'insolation ; les modifications de la circulation stratosphérique ; ou, plus récemment proposée et de manière plus controversée, les variations du vent solaire. Toutefois l'effet de ces mécanismes n'a pas encore été établi.

Certaines interprétations erronées de la figure 1.1 ont trait à l'importance et à la complexité du rôle des aérosols. En indiquant un niveau de réchauffement des gaz à effet de serre globalement égal au pouvoir refroidissant des aérosols, ce dernier étant toutefois assorti d'une forte incertitude, l'idée a été accréditée chez certains que, devant une telle complexité du système climatique, on ne pouvait pas dire grand-chose.

De fait, il se produit une confusion fréquente entre les diagnostics tirés de ce diagramme et ce que seraient des pronostics pour le siècle futur : du fait de leur longue durée de vie, les gaz à effet de serre s'accumulent dans l'atmosphère, ce qui n'est pas le cas des aérosols. A la fin du XXIe siècle, le forçage radiatif des gaz à effet de serre devrait dominer fortement celui des aérosols, ce qui n'apparaît pas sur ce diagramme. Cette figure indique donc que, au XXe siècle, le réchauffement lié aux gaz à effet de serre a pu être masqué par les aérosols ; elle montre aussi la difficulté d'utiliser les résultats du XXe siècle pour appréhender le XXIe siècle. Toutefois, même si elle a pu le suggérer, elle n'indique pas que les aérosols pourraient durablement s'opposer à une augmentation des gaz à effet de serre.

5. La constante solaire est l'énergie reçue du soleil, au niveau de l'orbite terrestre, par seconde et par mètre carré.

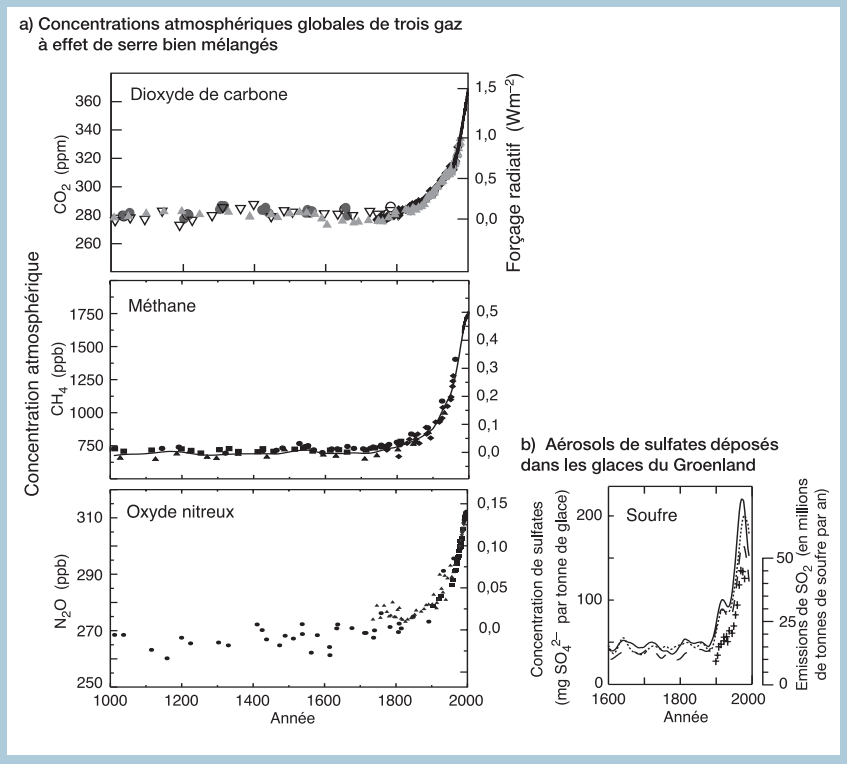
Le climat est-il en train de changer ?

L'évolution des concentrations atmosphériques

3e RAPPORT DU GIEC EXTRAIT

FIGURE 1.2

L'influence des activités humaines sur l'atmosphère durant l'ère industrielle



Sources

D'après IPCC, 2001, CO_2, p. 201 (fig. 3.2b), CH4, p. 249 (fig. 4.1a et b), N_20, p. 253 (fig. 4.2) et p. 307 (fig. 5.4a) ;

GIEC, 2002, Résumé à l'intention des décideurs, p. 7 (fig. 2) ;

GIEC, 2002, Résumé technique, p. 34 (fig. 8).

La figure 1.2.a présente l'évolution sur mille ans de la concentration atmosphérique en dioxyde de carbone, en méthane et en oxyde nitreux et le forçage radiatif estimé correspondant (échelle de droite). La figure 1.2.b montre l'évolution de 1600 à 2000 de la concentration en sulfates au Groenland et l'estimation des émissions de dioxyde de soufre correspondantes (échelle de droite et symbole +).

Durant les mille dernières années, les concentrations de CO_2, CH_4 et N_2O dans l'atmosphère ont été déterminées sur plusieurs sites de l'Antarctique et du Groenland (repérés par différents symboles sur la figure 1.2.a) en analysant des carottes de glace et des échantillons provenant de névés. Pour les dernières décennies, ces données sont complétées par l'analyse directe d'échantillons atmosphériques (les courbes continues pour le CO_2 et le CH_4). Les trois courbes montrent une croissance exponentielle de la concentration atmosphérique de ces gaz à effet de serre à partir du début de l'ère industrielle. L'effet des émissions anthropiques est net et dépourvu d'ambiguïté.

Les concentrations de sulfates dans certaines carottes glaciaires forées au Groenland (indiquées par des lignes sur la figure 1.2.b), qui correspondent à des dépôts sur le site, nous informent sur les émissions de dioxyde de soufre sous les latitudes moyennes de l'hémisphère Nord. Ces mesures montrent clairement la différence de comportement des aérosols et des gaz à effet de serre tels que le CO_2, le CH_4 et le N_2O. Du fait de leur temps de séjour élevé dans l'atmosphère (supérieur à dix ans), ces trois gaz y sont intimement mélangés et leur concentration en tout point du globe reflète des émissions de sources géographiques différentes. En revanche, les sulfates ont une durée de vie dans l'atmosphère beaucoup plus courte, ils ne diffusent pas à grande échelle et leurs variations de concentration suivent rapidement les émissions de SO_2. La croissance des émissions anthropiques de SO_2 est très marquée durant l'ère industrielle, mais elle pourrait s'inverser rapidement.

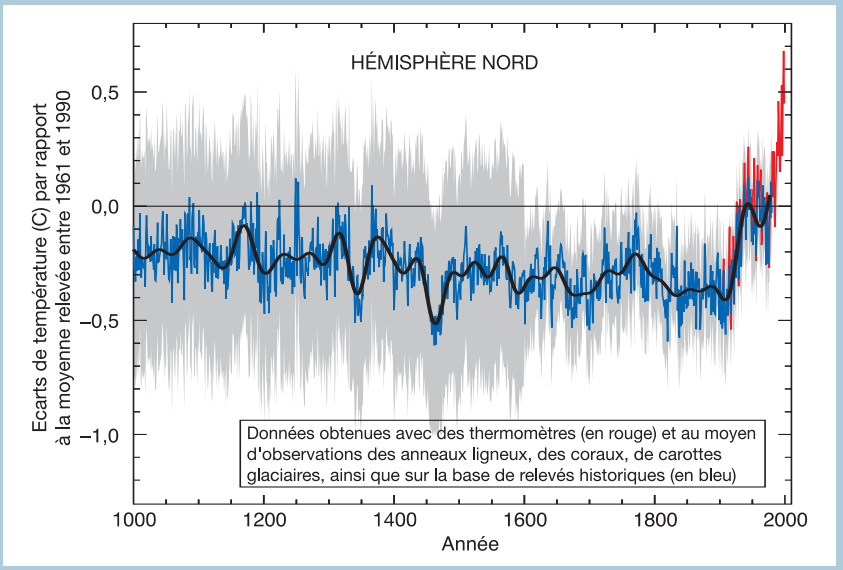
Le premier et le deuxième rapport du GIEC avaient montré que les fluctuations de concentration mesurées lors de l'ère industrielle sont sans précédent tout au long des derniers cycles glaciaires-interglaciaires, c'est-à-dire depuis plusieurs centaines de milliers d'années.

L'évolution de la température durant le dernier millénaire

3e RAPPORT DU GIEC EXTRAIT

FIGURE 1.3

Températures de l'hémisphère Nord durant le dernier millénaire



Sources

IPCC, 2001, p. 134 (fig. 2.20) ;

GIEC, 2002, Résumé à l'intention des décideurs, p. 4 (fig. 1) ;

GIEC, 2002, Résumé technique, p. 28 (fig. 5).

La figure 1.3 s'appuie sur des données reconstruites provenant des anneaux de croissance des arbres, des coraux, de carottes glaciaires et de relevés historiques (en bleu), ainsi que de mesures directes (en rouge). La courbe noire représente les données filtrées de leurs fluctuations inférieures à dix ans. Une limite d'écart-type est indiquée en gris.

La figure 1.3 est l'un des éléments qui a permis d'aboutir aux conclusions suivantes.

3e RAPPORT DU GIEC EXTRAIT

Il est probable que le réchauffement qui s'est produit au XXe siècle, tant par son ampleur que par sa durée, soit sans précédent depuis mille ans. Les années 90 représentent sans doute la décennie la plus chaude du millénaire dans l'hémisphère Nord, et 1998 a probablement été l'année record à cet égard. Notre compréhension des fluctuations de la température durant le dernier millénaire a considérablement progressé, notamment grâce à la synthèse des diverses reconstitutions de cette évolution. Le nouveau relevé détaillé des températures dans l'hémisphère Nord (...) [montre qu'] une période relativement chaude, allant du XIe au XIVe siècle, a précédé une période relativement froide, allant du XVe au XIXe siècle. Par contre, ces données ne confirment pas la synchronicité à l'échelle planétaire de ces périodes connues respectivement sous les noms de « période de réchauffement médiéval » et « petit âge glaciaire ». Comme l'indique la figure TS5 [fig. 1.3 dans ce texte], le réchauffement de l'hémisphère Nord, tant par son ampleur que par sa durée, semble avoir été sans précédent depuis mille ans et ne peut donc être considéré comme un simple retour à la normale après le petit âge glaciaire.

Source

GIEC, 2002, Résumé technique, p. 27.

Cette figure, qui contient des informations importantes, a fait l'objet de trois critiques au sein et à l'extérieur de la communauté scientifique. La première est qu'elle ne montre pas clairement certains épisodes connus (petit âge glaciaire, optimum médiéval), la raison proposée étant que ces événements n'auraient pas laissé de trace forte à l'échelle de tout l'hémisphère Nord, comme mentionné plus haut. De plus, pour certains, l'information délivrée est peu plausible pour la période 1900-1950 car, d'une part, le réseau de données était encore peu fourni et, d'autre part, l'augmentation des gaz à effet de serre ne permet pas d'expliquer l'élévation de la température durant cette

période. Enfin, d'autres arguent qu'il n'est pas légitime de rassembler sur un même diagramme des données provenant de sources aussi différentes.

Certaines de ces critiques sont fondées, mais ne doivent pas remettre en cause l'information essentielle contenue dans le diagramme : si l'on considère les comportements au sein d'un même ensemble de données, la croissance de la température des années 60-70 jusqu'à aujourd'hui indique une vitesse d'évolution du climat jamais égalée durant le dernier millénaire, même en tenant compte des incertitudes.

Situer les évolutions récentes des températures dans l'ensemble des données antérieures disponibles, et ceci sur une période de 1 000 ans, permet surtout de mettre en évidence les différences de comportement : croissance ou baisse de température, fréquence et amplitude de variation, caractéristiques de ces fréquences. En revanche, la figure 1.3 ne permet pas de comparer directement des valeurs absolues entre la séquence des données reconstituées et celle des données mesurées. Les deux séries de données ont été calées pour établir la coïncidence qui apparaît sur la figure, ce qui donne l'impression d'une grande continuité dans les sources de données, continuité qui n'est pas totalement fondée dans la réalité. Une grande variété de données paléoclimatiques — issues de coraux, de carottes glaciaires, de l'observation des anneaux de croissance des arbres et d'autres données indirectes — a été utilisée. L'absence ou la rareté de données dans certaines régions a été palliée par des projections, qui peuvent aussi expliquer en partie que n'apparaissent pas des épisodes tels que le petit âge glaciaire. A partir du milieu du XIXe siècle, les mesures à l'aide d'instruments calibrés deviennent suffisamment fournies à l'échelle de l'hémisphère Nord pour que l'on puisse en tirer des moyennes, dont la précision augmente avec le temps. La nature des données dominantes change entre les périodes pré- et postindustrielles, et si l'on peut utiliser la figure 1.3 pour livrer un message sur certaines valeurs extrêmes, présentant ainsi l'année 1998 et la dernière décennie comme des records, l'essentiel de l'information utilisable ne concerne pas les valeurs absolues, mais le niveau de variabilité naturelle. Or, celui-ci paraît trop faible pour rendre compte du réchauffement récent. L'évolution d'autres variables comme le recul des glaciers (lire paragraphe suivant) confirme ce diagnostic.

Les efforts importants du GIEC pour situer les évolutions récemment constatées de la température par rapport à des données passées s'appuient sur une science difficile et incertaine. De ce fait, ces travaux ont suscité des critiques au sein de la communauté scientifique. La contribution de Michael Ghil en est une illustration.

LIRE PAGE 30 ▸

Toutefois, la focalisation d'un grand nombre de critiques sur cette partie du rapport ne doit pas faire oublier que montrer l'effet des activités humaines sur le climat du XXe siècle n'est pas essentiel pour mettre en évidence un risque très probable pour le futur. En particulier, expliquer précisément le commencement du réchauffement n'est pas nécessaire.

La même remarque vaut pour le rôle possible du soleil dans les évolutions au XXe siècle. Même si les mécanismes par lesquels le soleil aurait pu influencer notre climat ne sont pas entièrement connus, on peut parfaitement imaginer qu'une partie des variations constatées au XXe siècle corresponde à des fluctuations de l'intensité du rayonnement solaire. Il s'agit même d'une explication plausible des variations pendant la première moitié du XXe siècle. Ce point a fait l'objet de débats assez vifs, dont les conséquences restent mineures par rapport à l'analyse des variations climatiques futures.

Les autres manifestations du changement climatique au XXe siècle

La température ne constitue qu'un indice des changements climatiques, qui se manifestent aussi de manière plus sensible par des varia-

tions de précipitations, de couverture de neige ou de glace, voire des modifications dans certaines formes de variabilité climatique. Ces variables fluctuent de manière naturelle, à des échelles de temps variées : cycles saisonniers, fluctuations interannuelles — la plus célèbre et la plus puissante de ces fluctuations est El Niño (ENSO pour *El Niño Southern Oscillation*) —, ou décennales. Sur l'Atlantique par exemple, l'indice nord-atlantique (ou NAO pour *North Atlantic Oscillation*), qui mesure les variations de la route des dépressions par la différence de pression entre Reykjavik et Lisbonne, présente une oscillation très lente. Déterminer que le climat change revient à montrer soit qu'une tendance continue se superpose à ces fluctuations naturelles, soit que ces fluctuations elles-mêmes changent de caractère.

L'analyse de ces variations au cours du XXe siècle occupe un chapitre entier du rapport qu'il est impossible de rappeler ici en détail. Nous nous limiterons à quelques remarques.

Tout d'abord, plusieurs variables lentes du système climatique, qui peuvent lisser l'effet de fluctuations rapides, montrent une évolution en bon accord qualitatif avec le réchauffement montré sur la figure 1.3. Ainsi, depuis la fin du XIXe siècle, un recul de l'extension des grands glaciers de montagne est observé de manière systématique à l'échelle de la planète. L'ensemble de ces données laisse peu de doute sur le fait que le climat est en train de changer de façon globale et cohérente, quelle qu'en soit la cause.

Ensuite, la fin du XXe siècle a vu la manifestation de variations climatiques particulières : par exemple, la succession de deux événements « El Niño » très importants, ou encore l'augmentation régulière de l'indice NAO. De même, outre les tendances globales notées plus haut, des changements régionaux caractérisés (par exemple de température) sont constatés. Il est très difficile de savoir si ces changements, indéniables, relèvent de la variabilité naturelle du climat ou si ils sont le résultat des activités humaines.

Enfin, il est pour le moment beaucoup plus difficile de montrer une évolution significative des processus les plus rapides au sein du système climatique (en particulier des précipitations).

Les perspectives pour le XXIe siècle

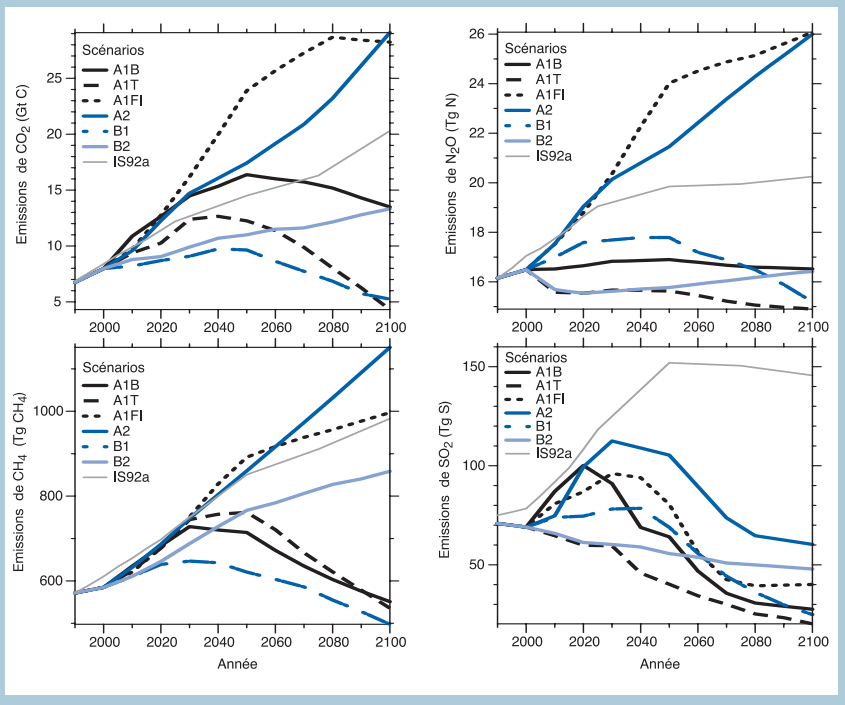
Le seul outil permettant de se projeter dans le futur est la modélisation numérique. Le rapport du GIEC présente de manière assez détaillée les résultats de projections climatiques jusqu'à la fin du XXIe siècle. Celles-ci ont été réalisées une fois franchie une étape préalable et nécessaire : déterminer pour la même période des scénarios d'évolution des agents de forçage que sont les gaz à effet de serre et les aérosols (lire chapitre 3, pp. 77 à 81). Ces projections relèvent du travail des socio-économistes. Elles s'appuient sur une série d'images possibles de l'avenir, qui possèdent une cohérence interne en termes de démographie, de mode de développement économique, de choix sociaux et technologiques. Les scénarios fournis aux modélisateurs du climat transcrivent ces hypothèses en émissions futures de gaz à effet de serre ou d'aérosols. Les climatologues intègrent ensuite ces scénarios d'émission dans leurs modèles climatiques. Enfin, pour exploiter au mieux les résultats obtenus, les décideurs doivent être informés des modalités de construction des scénarios d'émission (lire chapitre 3, *ibid.*). Hervé Le Treut présente les évolutions qu'ont connues les modèles climatiques et leur rôle dans l'expertise du GIEC. Michel Petit quant à lui décrit les différents types d'incertitudes présentes dans les travaux du GIEC ainsi que l'effort fourni pour qualifier les incertitudes de façon plus cohérente et plus lisible pour les décideurs.

LIRE PAGE 32 ▸
LIRE PAGE 34 ▸

3e RAPPORT DU GIEC EXTRAIT

FIGURE 1.4

Scénarios d'émission de CO_2, CH_2, N_2O et SO_2



Cette figure présente les émissions de CO_2, CH_4, N_2O et SO_2 pour six scénarios d'émission de référence issus du rapport spécial du GIEC sur les scénarios d'émission, SRES*, publié en 2000 — A1B, A2, B1 et B2, AIF1 et A1T. Pour le CO_2 et le SO_2 il s'agit des émissions anthropiques, alors que pour le CH_4 et le N_2O il s'agit des émissions totales, qui incluent une composante naturelle constante. A titre de comparaison, le scénario IS92a, issu du deuxième rapport d'évaluation du GIEC publié en 1995, est également indiqué.

* SRES pour *Special Report on Emissions Scenari*, rapport spécial du GIEC sur les scénarios d'émission publié en 2000.

Sources

D'après IPCC, 2000, Special Report on Emissions Scenario ;

GIEC, 2002, Résumé technique, p. 60 (fig. 17).

Les hypothèses pour élaborer les scénarios d'émission figurent dans le chapitre 3 (lire pp. 78 et 79). La figure 1.4 nous conduit aux deux remarques suivantes.

Dans le second rapport d'évaluation du GIEC (SAR, 1995), la plupart des modèles ont utilisé le scénario IS92a, qui est reporté sur les diagrammes ci-dessus. Pour les gaz à effet de serre, les nouvelles estimations s'inscrivent de part et d'autre de ce scénario. Par contre, dans les nouveaux scénarios du SRES, l'estimation des émissions futures de dioxyde de soufre, qui produisent des aérosols de sulfates, a considérablement diminué comparativement au scénario IS92a. Ceci est dû aux changements structurels du système énergétique et aux mesures prises pour lutter contre la pollution atmosphérique à l'échelon local et régional. Ces émissions diminuent globalement dans tous les scénarios au-delà de 2050, ce qui augmente le réchauffement pour cette période, le forçage de ces aérosols étant négatif.

Ces scénarios ont été élaborés sans postuler l'intervention explicite de politiques générales en matière de climat. Ils ne prennent donc pas en compte *stricto sensu* la Convention cadre des Nations unies sur les changements climatiques et les objectifs d'émission fixés par le protocole de Kyoto, même s'ils intègrent, à des degrés divers, des préoccupations environnementales, par exemple sur le développement de technologies peu consommatrices d'énergie.

Il en résulte que les scénarios les plus optimistes tablent sur une stabilisation des émissions à l'horizon 2100 à 5 gigatonnes de carbone par an (GtC/an). Or, lutter substantiellement contre le changement clima-

tique implique de stabiliser non pas les émissions mais les concentrations de gaz à effet de serre dans l'atmosphère. Cet objectif nécessite *a minima* de parvenir à des flux annuels d'émission de 2 à 3 GtC par an – ordre de grandeur de ce qui est repris à l'atmosphère par les puits naturels de carbone que sont l'océan ou la végétation – alors que le niveau actuel se situe environ à 7 GtC par an.

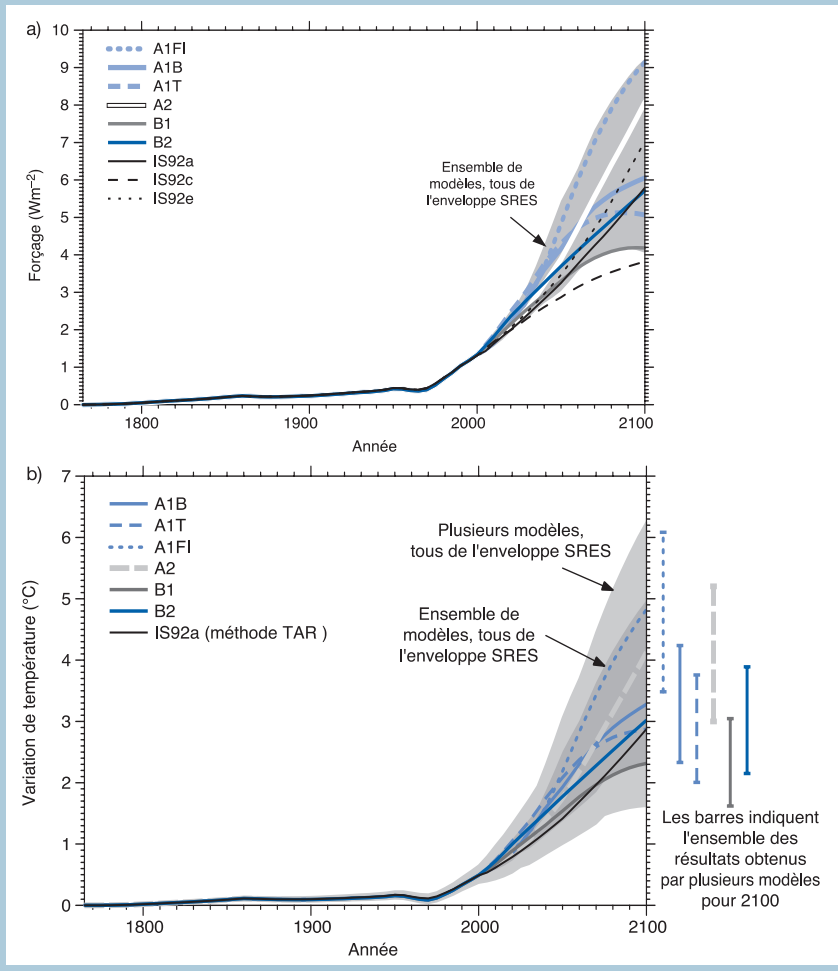
Ces scénarios montrent donc la nécessité de politiques volontaristes pour stabiliser la concentration des gaz à effet de serre dans l'atmosphère. Quant à l'objectif de stabilisation fixé, il dépend de l'appréciation des risques climatiques encourus (lire chapitre 2, pp. 47 à 51 et chapitre 3, pp. 89 à 93).

Les projections de l'évolution du climat

3e RAPPORT DU GIEC EXTRAIT

FIGURE 1.5

Evolution des températures globales

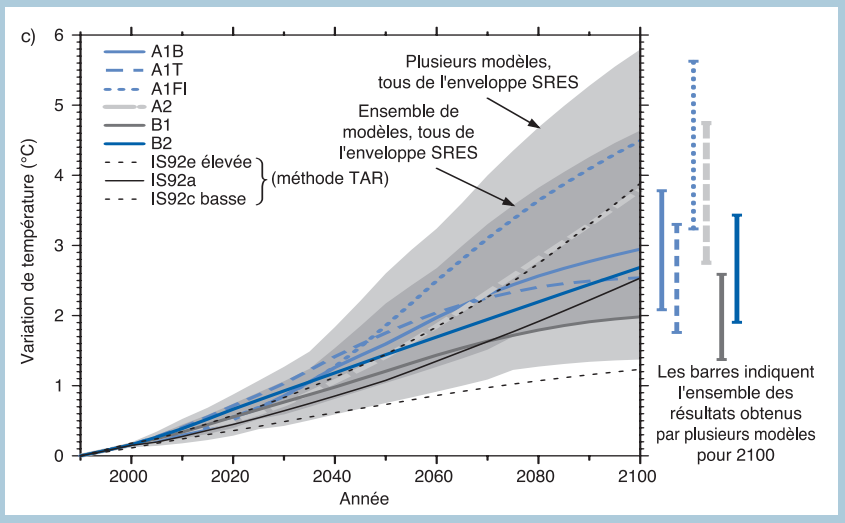


Sources

Figure 1.5.a : IPCC, 2001, p. 554 (fig. 9.13a) ; GIEC, 2002, Résumé technique, p. 62 (fig. 19). Figure 1.5.b : IPCC, 2001, p. 554 (fig. 9.13.b) ; GIEC, 2002, Résumé technique, p. 66 (fig. 22.b).

La figure 1.5 utilise des modèles simples calibrés sur les résultats de modèles complexes pour présenter une gamme de futurs climatiques reflétant à la fois les incertitudes liées aux scénarios économiques et à la physique des modèles.

La figure 1.5.a donne le forçage radiatif anthropique historique, prolongé par le forçage radiatif jusqu'à 2100 pour les quatre scénarios de référence et pour deux scénarios supplémentaires de la famille A1, qui illustrent différentes options technologiques. L'ombre bleue représente l'enveloppe du forçage pour l'ensemble de trente-cinq scénarios. Les forçages correspondant aux scénarios IS92a, IS92c et IS92e sont également montrés.



La figure 1.5.b présente les variations historiques et d'origine anthropique de la température moyenne globale ainsi que les projections pour les scénarios du SRES et pour IS92a. L'ombre bleu foncé représente l'enveloppe obtenue pour l'ensemble des scénarios en utilisant à chaque fois les résultats d'un modèle moyen. Les barres verticales représentent la gamme des résultats issus du modèle simple en 2100, calibré sur six modèles complexes pris comme référence, lorsque l'on considère à nouveau l'ensemble des scénarios. L'enveloppe bleu clair correspond à la combinaison des incertitudes associées aux modèles et aux scénarios. La figure 1.5.c est similaire à la figure 1.5.b, mais les résultats sont relatifs à l'année 1990 et présentés pour la période 1990-2100.

Sources

Figure 1.5.c : IPCC, 2001, p. 555 (fig. 9.14) ;
GIEC, 2002, Résumé à l'intention des décideurs, p. 13 (fig. 5d) ;
GIEC, 2002, Résumé technique, p. 66 (fig. 22a).

La question posée initialement par les experts du groupe 3 à ceux du groupe 1 peut être formulée de la manière suivante : « Etant donné différents avenirs socio-économiques possibles, élaborés à partir d'hypothèses variées (sur la démographie, la progression et la diffusion des technologies...), appelés scénarios, est-il possible de discriminer ces scénarios du point de vue de la réponse climatique ? ».

Les résultats fournis par les modèles climatiques à partir de ces scénarios se situent dans une fourchette assez large de réponses climatiques possibles, comme l'indique la figure 1.5 pour des paramètres comme la température et le forçage radiatif.

Cette figure a été, elle aussi, l'une des plus médiatisées du rapport. Sa lisibilité n'est pas immédiate, car elle réunit sur un même graphique les résultats issus de différents scénarios et de différents modèles climatiques. Elle illustre deux résultats importants. En premier lieu, dans tous les cas, le système climatique est appelé à se modifier de manière importante au XXIe siècle. En outre, l'incertitude sur l'évolution climatique étant due environ pour moitié aux scénarios, donc à notre comportement, il existe des marges de manœuvre importantes pour l'action. Une lecture rapide de ce diagramme a conduit les médias à conclure à une amplification du risque climatique estimé par rapport au deuxième rapport du GIEC. De fait, en établissant que les projections pour la température moyenne globale en 2100 sont comprises entre 1,4 °C et 5,8 °C, le troisième rapport considère possible un scénario réellement catastrophique (un réchauffement de 5,8 °C est équivalent en amplitude à la variation qui nous sépare d'un âge glaciaire), qui va un peu au-delà des prévisions les plus pessimistes du deuxième rapport. Il convient néanmoins de comprendre que cet élargissement de la fourchette des futurs possibles tient en premier lieu à la prise en compte d'une plus grande variété de scénarios socio-économiques.

En réalité, la figure 1.5 agrège deux types d'incertitude de nature très différente : les incertitudes liées aux scénarios d'émissions d'une part,

c'est-à-dire aux choix qu'effectueront les sociétés durant ce siècle — par nature, toute projection pour le futur comporte une part d'incertitude dont l'amplitude croît avec l'horizon temporel considéré, la complexité et la sensibilité des paramètres pris en compte — ; celles liées aux modèles climatiques, d'autre part. Pour un scénario donné, les écarts des résultats obtenus au moyen de différents modèles reflètent le fait que ces modèles sont imparfaits, inachevés et perfectibles et, par ailleurs, le caractère par essence non totalement prévisible de la physique qui gouverne certains éléments sensibles, comme les phénomènes qui se produisent aux petites échelles atmosphériques (c'est le cas en particulier pour les nuages, qui agissent de manière complexe sur l'équilibre radiatif de la planète).

La part d'incertitude liée aux modèles, mesurée par la dispersion des résultats des modèles existants, n'a pas évolué de manière significative au cours des dernières années. Un effort important reste à faire pour valider les modèles en ce qui concerne les rétroactions nuageuses, dont l'effet sur la réponse climatique est encore mal connu. Il n'est pas évident toutefois qu'une meilleure connaissance de ces rétroactions puisse réduire rapidement l'incertitude au sein des modèles. Cependant, les scientifiques se doivent de mieux cerner les causes des incertitudes liées à ces rétroactions, comme l'explique Sandrine Bony. Un atelier du GIEC sur les rétroactions et la sensibilité du climat a été organisé à Paris en juillet 2004.

LIRE PAGE 37 ▸

La médiatisation de la figure 1.5 a conduit à accorder une grande importance aux valeurs extrêmes de la fourchette pour la température moyenne globale. Si ces valeurs agrègent des processus de nature différente, *a contrario*, elles ne tiennent pas compte de la modification de certains processus susceptibles d'amplifier les risques climatiques, comme par exemple le cycle du carbone. Actuellement, celui-ci modère de manière naturelle l'effet des émissions, en reprenant en permanence (dans la végétation continentale, dans les océans) la moitié du carbone injecté dans l'atmosphère. Toutefois, le rapport présente deux simulations (l'une française et l'autre anglaise) qui montrent que, dans un climat plus chaud, cet effet d'absorption naturelle du CO_2 pourrait fortement diminuer, conduisant à des réchauffements beaucoup plus importants, comme le développe Pierre Friedlingstein.

LIRE PAGE 39 ▸

En résumé, la figure 1.5 donne des ordres de grandeur très utiles, qui doivent être toutefois analysés avec soin. En effet, toutes les formes d'amplification éventuelles du changement climatique ne sont pas prises en compte, ce qui conduit à minorer le risque. En revanche, un large éventail de scénarios possibles est considéré, ce qui conduit à mélanger les éléments liés au comportement des sociétés et la réponse climatique.

Insistons sur un résultat important. Les scénarios du SRES ne permettent pas de stabiliser les concentrations. De ce fait, tous les scénarios et les modèles envisagés se déploient à l'extérieur d'une zone « interdite » pour les projections de température et de forçage, qui est précisément la zone où le climat n'évoluerait pas. Ceci traduit l'inexorabilité du changement climatique dans le cas où des réductions volontaires des émissions, plus fortes que les réductions conjoncturelles envisagées par les scénarios du SRES, ne seraient pas réalisées.

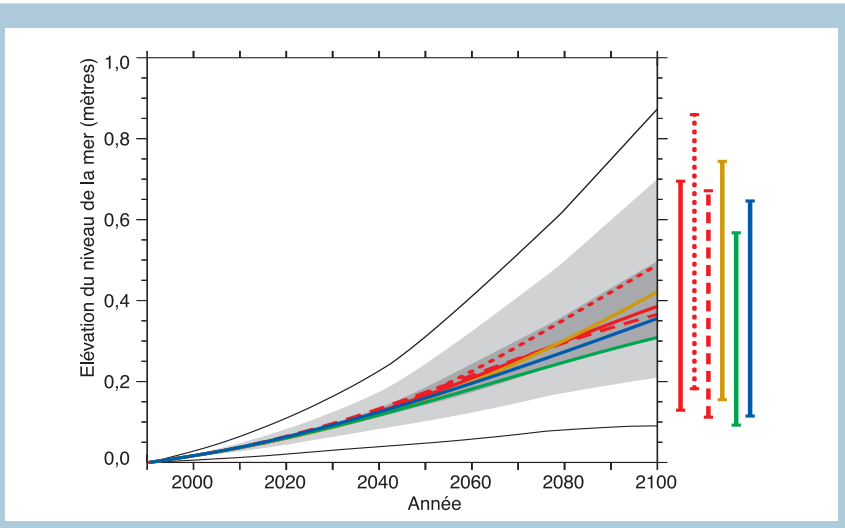
L'après-XXIe siècle

Les scénarios envisagés dans le rapport du GIEC sont focalisés sur le XXe siècle. Or, une partie des risques importants liés aux émissions actuelles se situe à un horizon plus lointain. Ces risques sont abordés de manière générale dans le chapitre 7 du rapport. L'élévation du niveau des mers (qui fait l'objet du chapitre 11) constitue un bon exemple de ces problèmes et de la difficulté à en rendre compte dans un cadre plus large que celui de la communauté scientifique.

3e RAPPORT DU GIEC EXTRAIT

FIGURE 1.6

Elévation du niveau des mers au XXIe siècle



La figure 1.6 représente l'élévation moyenne globale du niveau de la mer de 1990 à 2100 dans les scénarios du SRES. La dilatation thermique et la modification de la couverture glaciaire ont été calculées en utilisant un modèle simple pour le climat, calibré séparément pour chacun des modèles de circulation générale couplés océan-atmosphère (ou MCGAO). Les contributions dues aux changements dans le pergélisol*, aux dépôts sédimentaires et à l'ajustement sur le long terme de nappes glaciaires aux changements climatiques passés ont été ajoutées. Chacune des six lignes dans le fuseau central représente la moyenne des modèles MCGAO pour l'un des six scénarios de référence. La zone gris foncé montre la gamme des résultats de modèles MCGAO pour l'ensemble des scénarios du SRES. La zone gris clair représente la gamme des résultats pour tous les modèles MCGAO et pour l'ensemble des scénarios. La région délimitée par les deux lignes extérieures tient compte en outre des incertitudes dans les modifications de la couverture glaciaire, du pergélisol et de la sédimentation. Toutefois, les incertitudes relatives aux modifications dynamiques des plaques de glace dans l'ouest de l'Antarctique n'ont pas été prises en compte. Les barres verticales représentent la gamme des résultats en 2100 de tous les modèles MCGAO pour les six scénarios de référence.

* Le pergélisol est une étendue de sol ou de roche dont la température se maintient à 0 °C ou en dessous durant au moins deux ans. Le pergélisol peut contenir ou non de la glace et être ou non recouvert de neige.

Sources

IPCC, 2001, p. 671 (fig. 11.12) ;
GIEC, 2002, Résumé à l'intention des décideurs, p. 13 (fig. 5e) ;
GIEC, 2002, Résumé technique, p. 69 (fig. 24).

Le changement climatique devrait se traduire également par une élévation du niveau des mers, résultant potentiellement de plusieurs facteurs dont les principaux sont : la dilatation thermique des océans ; la fonte des glaces de moyenne latitude ; la fonte des calottes glaciaires du Groenland et de l'Antarctique ; les contributions plus modestes du dégel du pergélisol et du dépôt de sédiments ainsi que des contributions continues des nappes glaciaires suite au changement climatique amorcé depuis le dernier maximum glaciaire.

L'horizon 2100 apparaît court au regard des échelles de temps qui gouvernent l'évolution du niveau des mers. Pour le niveau des océans, le rapport a procédé comme pour les autres paramètres à une collecte, puis à une analyse des données passées et des projections concentrées sur la période 1990-2100, ainsi qu'à quelques simulations allant jusqu'à l'an 3000.

Entre 1990 et 2100, les scénarios du SRES conduisent à une élévation moyenne globale du niveau de la mer qui se situe entre 0,09 m et 0,88 m, ces deux bornes étant bien sûr approximatives.

A l'échelle du XXIe siècle, l'élévation du niveau de la mer est due à deux phénomènes : la fonte des glaciers, davantage ceux de moyenne latitude (c'est-à-dire de montagne) que ceux du Groenland et de l'Antarctique, qui sont situés à des températures trop froides — au contraire, les calottes polaires sont susceptibles, dans un premier

temps, de stocker de l'eau en raison de l'augmentation des précipitations neigeuses – ; la dilation thermique de l'eau.

Or, la fonte des glaciers se poursuivra au-delà de 2100 avec une amplitude qui pourrait fortement augmenter. Il est donc important d'essayer d'étendre l'horizon temporel des projections issues des modèles climatiques, en particulier en ce qui concerne l'élévation du niveau des océans.

La circulation thermohaline

D'autres phénomènes pourraient atteindre un seuil critique dans un futur encore mal déterminé, probablement au-delà de 2100. C'est le cas du processus appelé de manière simplifiée « arrêt de la circulation thermohaline (ou du Gulf Stream) ». Est qualifiée de « thermohaline » la circulation à grande échelle dans les océans, qui a pour moteur les variations de densité liées aux différences de température (thermiques) et de salinité (halines), principalement en profondeur. Dans l'Atlantique Nord, la circulation thermohaline consiste en un déplacement vers le nord des eaux chaudes de surface et vers le sud des eaux froides des grands fonds, entraînant un transfert net de chaleur vers le pôle. Le Gulf Stream constitue probablement la composante la plus célèbre de cette circulation. Les eaux de surface s'enfoncent vers le fond dans des zones très restreintes situées sous des latitudes élevées. La salinité, acquise par évaporation au-dessus des océans tropicaux, puis partiellement perdue plus au Nord du fait des précipitations, joue un rôle déterminant dans les conditions de formation de l'eau profonde.

La plupart des modèles mettent en évidence, dès le XXIe siècle, une diminution de la circulation thermohaline dans l'hémisphère Nord, qui contribue à réduire le réchauffement en surface dans la partie septentrionale de l'Atlantique Nord. Il s'agit là de modifications réversibles. En revanche, certains modèles et calculs théoriques montrent que, au-delà d'un certain niveau de perturbation du système, on peut franchir un seuil. Ceci peut conduire alors à une circulation océanique très différente, sans formation d'eau profonde en Atlantique Nord, et avec un apport d'eau chaude par le Gulf Stream très limité en latitude. Il est encore trop tôt pour estimer avec confiance la probabilité d'un tel événement, qui serait irréversible, pour déterminer à quel seuil il pourrait se produire et quelles en seraient les conséquences pour le climat. Pour l'heure, aucune des projections obtenues à l'aide de modèles couplés ne fait état d'une disparition totale de la circulation thermohaline d'ici à 2100.

Appréhender les risques au-delà du XXIe siècle

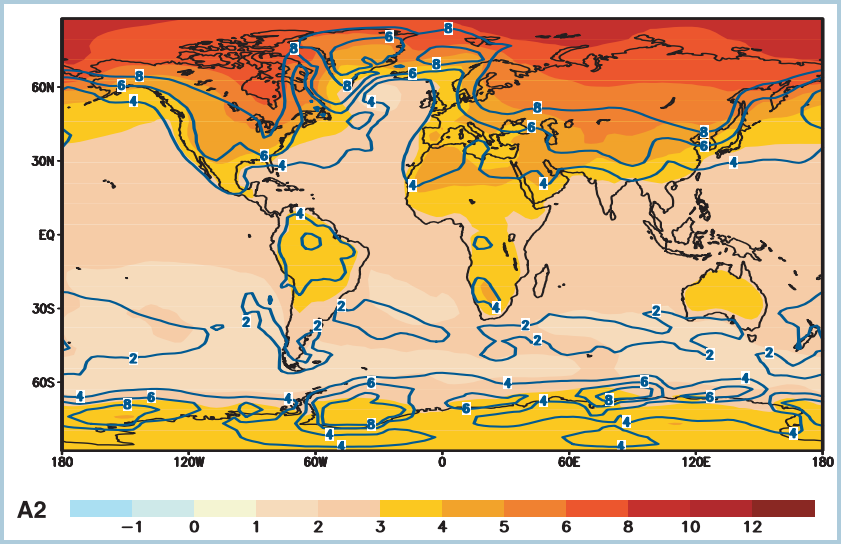
En insistant sur la période allant jusqu'à 2100, le GIEC met l'accent sur les risques « sensibles » (qui peuvent nous toucher, nous ou nos enfants), mais prend le parti de ne pas évoquer des risques plus lointains, éventuellement plus préoccupants, qui sont également liés aux émissions actuelles de CO_2. Toutefois, l'extension des scénarios climatiques à des futurs plus lointains permettrait de traiter certains phénomènes se développant au-delà du XXIe siècle à des échelles de temps plus pertinentes. Un tel exercice met certes en jeu des incertitudes plus grandes même si, à ces échéances, l'impact des émissions actuelles de gaz à effet de serre reste important du fait des échelles de temps du cycle du carbone (un siècle) ou des composantes lentes du système climatique (de l'ordre du millénaire pour l'océan profond ou les grands glaciers). Les types de développement socio-économique, presque impossibles à prévoir à de tels horizons, sont aussi déterminants. A ces échelles de temps on ne peut donc raisonner que sous la forme de scénarios destinés à explorer la possibilité de risques importants.

Un changement climatique fortement hétérogène

3e RAPPORT DU GIEC EXTRAIT

FIGURE 1.7

Changement annuel moyen de température à la fin du XXIe siècle



La figure 1.7 analyse le changement annuel de température à la fin du XXIe siècle à partir d'un ensemble de modèles pour le scénario A2 du SRES. Le changement moyen de température est représenté en couleur. Pour estimer l'importance et la signification de cette variation, on la rapporte à l'écart-type entre modèles (isothermes en bleu fin) (unité : °C). Si le changement moyen est plus grand que l'écart-type entre modèles (isothermes en vert, valeurs absolues), la confiance dans la prévision des modèles en est renforcée. Les changements sont analysés pour la période 2071-2100 par rapport à la période 1961-1990. Le rapport du changement moyen avec l'écart-type augmente vers les basses latitudes. En outre, cette figure montre que le réchauffement serait plus prononcé sur les continents, en particulier sur ceux de l'hémisphère Nord.

Sources

IPCC, 2001, p. 547 (fig. 9.10.d) ;
GIEC, 2002, Résumé technique, p. 64 (fig. 20 (A2)).

Le réchauffement climatique projeté n'est pas distribué de manière homogène sur l'ensemble du globe. Il est beaucoup plus fort sous les hautes latitudes et sur les continents que le réchauffement moyen global. Ainsi, la plus grande partie du réchauffement de surface se produit sur les deux septièmes de la surface du globe qui n'est pas couverte par les océans. Des raisonnements physiques simples rendent compte de ces grandes tendances. L'inertie thermique de l'océan explique sa réponse plus lente en température (alors même que c'est dans l'océan qu'une grosse partie de la chaleur va être stockée). Le réchauffement plus fort sous les hautes latitudes s'explique par le fait que l'air y est plus stable et que par suite le réchauffement reste confiné dans les basses couches de l'atmosphère. En revanche, sous les basses latitudes, des « recirculations » convectives d'air se produisent jusqu'à des altitudes élevées, diminuant le changement de température en surface, mais entraînant un accroissement des précipitations. Le réchauffement moindre dans l'Atlantique Nord correspond à une amorce du ralentissement de la circulation océanique thermohaline.

Si la localisation du réchauffement n'est probablement pas prévisible en détail, les grandes lignes de la réponse globale simulée par les modèles relève de mécanismes physiques simples. Ceci permet de caractériser avec une certaine confiance de grandes « zones de risque » à la surface du globe, à l'intérieur desquelles les principaux traits de l'évolution du climat peuvent être évalués statistiquement.

L'échelle régionale

Le problème posé

Les modèles couplés de circulation générale de l'atmosphère et de l'océan (MCGAO) utilisés pour effectuer les projections à 2100 du changement climatique dû aux forçages anthropiques ont une résolution horizontale relativement faible, de l'ordre de 300 km à 500 km pour la composante atmosphérique. Ceci est dû aux échelles de temps très longues pour lesquelles on veut comprendre l'évolution climatique (XXe et XXIe siècle, soit deux cents ans environ), qui limitent la résolution spatiale pour un simple problème de temps de calcul disponible : améliorer la résolution d'un facteur dix dans les directions est-ouest et nord-sud implique de multiplier par mille le temps de calcul — ce qui pourra être envisagé dans les années à venir sur des machines comme le Earth Simulator japonais, mais qui était hors de portée des groupes de modélisation en 2001.

Au-delà de l'échelle globale que nous venons d'expliciter, nous voulons anticiper les changements climatiques possibles à l'échelle d'un continent, d'une région et à l'échelle locale. Chaque étape amène une difficulté et une incertitude supplémentaires, qui peuvent être d'ordre fondamental — pour une même structuration du réchauffement climatique à l'échelle globale, il peut y avoir plusieurs réponses locales — ou d'ordre numérique — le maillage du problème est trop lâche pour décrire les phénomènes à une petite échelle.

La philosophie des techniques utilisées

Pour obtenir des informations régionales — au sens du rapport du GIEC, c'est-à-dire pour des échelles spatiales de l'ordre de plusieurs centaines de kilomètres carrés, plusieurs techniques dites de « régionalisation » ont été développées : des modèles globaux avec un maillage variable, qui permet de se focaliser sur une région donnée ; des modèles climatiques régionaux ; des méthodes empiriques/statistiques et statistiques/dynamiques, qui relient l'information régionale aux simulations globales sur une simple base statistique et qui peuvent s'appuyer ou non sur une description explicite de la dynamique atmosphérique.

L'essentiel des travaux a été effectué depuis le second rapport du GIEC, qui ne comportait pas, comme le troisième, un chapitre dédié à ces questions, le chapitre 10, « Information climatique régionale : évaluation et projections ». La philosophie commune à ces techniques est d'utiliser des données fournies par des modèles de circulation générale couplés afin de produire des informations régionales supplémentaires, pour une période donnée, en recalculant les résultats du modèle couplé MCGAO sur une région et une échéance temporelle données avec un modèle de plus petite échelle (purement atmosphérique).

Ces modèles régionaux n'apportent une information utile que si les résultats du modèle couplé MCGAO à plus grande échelle sont eux-mêmes corrects. Nous avons vu que ces derniers étaient tributaires du scénario d'émission, mais aussi de la manière dont la représentation de certains processus physiques — ou encore l'imprévisibilité partielle du système climatique — affecte la réponse des modèles. Pour que le travail permettant d'affiner les résultats des MCGAO à l'échelle d'une région (par exemple la France) soit crédible, il faut évaluer la confiance que l'on peut accorder à leurs résultats à une échelle un peu plus vaste (par exemple l'Europe).

Deux critères peuvent être utilisés : la capacité des modèles à rendre compte du climat passé ou présent dans les zones considérées ; le degré de convergence des simulations réalisées entre les différents modèles. Les figures 1.8 et 1.9 analysent les variations de température et de précipitations selon cette dernière approche.

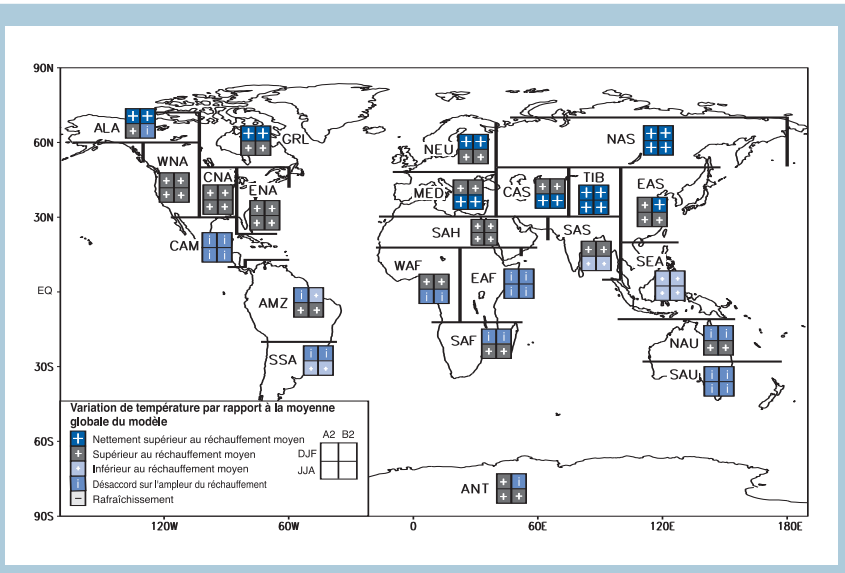
Il est difficile de synthétiser l'information fournie par les modèles pour les évolutions régionales des températures, et encore plus pour les précipitations, car celles-ci peuvent diminuer ou croître. Ceci explique que, dans le rapport, les figures sont élaborées et complexes, difficiles à lire car contenant une grande quantité d'informations.

La température

3e RAPPORT DU GIEC EXTRAIT

FIGURE 1.8

Modification du réchauffement régional : concordance entre plusieurs modèles



Dans la figure 1.8, les régions sont classées selon que l'on y constate un accord sur un réchauffement supérieur à 40 % de la moyenne globale (très supérieur au réchauffement moyen), un réchauffement supérieur à la moyenne globale (supérieur au réchauffement moyen), un réchauffement inférieur à la moyenne globale (inférieur au réchauffement moyen) ou un désaccord entre les modèles sur l'amplitude du réchauffement régional relatif (amplitude de réchauffement non concordante). Pour chaque région, quatre carrés illustrent la combinaison de deux critères : deux scénarios sont considérés (GG prend en compte l'augmentation des gaz à effet de serre uniquement et GS aussi celle des sulfates) ; et deux saisons (DJF : décembre-janvier-février, JJA : juin-juillet-août). Pour construire la figure, une moyenne des résultats fournis par un ensemble d'expériences a été effectuée et un « accord » a été défini si au moins 4 des 5 modèles GG étaient concordants ou au moins 3 des 4 modèles GS. Le réchauffement global annuel moyen des modèles utilisés s'étend de 3 °C à 4,9 °C pour GG et de 2,2 °C à 3,8 °C pour GS ; par conséquent, une amplification régionale de 40 % représente des gammes de réchauffement de 4,2 °C à 6,9 °C pour GG et de 3,5 °C à 5,3 °C pour GS respectivement.

Sources

IPCC, 2001, p. 600 (chapitre 10, encadré 1, fig. 1) ;

GIEC, 2002, Résumé technique, p. 65 (fig. 21)

L'unanimité de tous les modèles à prédire un réchauffement se traduit bien sûr par une certaine convergence des résultats. Celle-ci est d'autant plus marquée que les modèles s'accordent pour prédire un réchauffement plus fort sur les continents que sur les régions océaniques, généralement plus fort en hiver et plus marqué sous les hautes latitudes de l'hémisphère Nord.

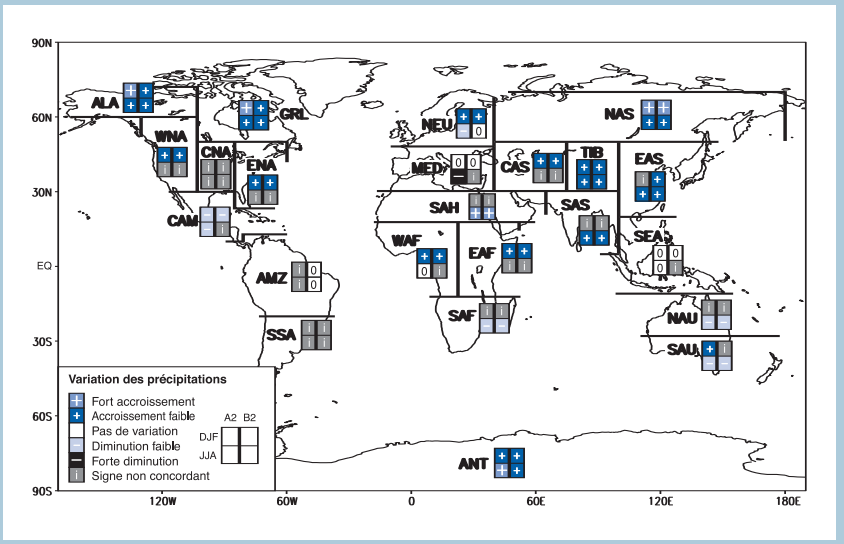
La figure 1.8 montre une certaine unanimité des modèles en termes de structuration à grande échelle de la réponse thermique – même si, nous l'avons vu, cet accord sur la distribution géographique du réchauffement s'accompagne d'une incertitude sur l'amplitude de ce réchauffement, qui peut varier fortement d'un modèle à l'autre.

Cet accord entre modèles traduit souvent des processus physiques relativement simples et bien compris : inertie thermique des continents plus faible que celle des océans ; rôle du brassage convectif des régions de basses latitudes qui limite l'augmentation de température.

3e RAPPORT DU GIEC EXTRAIT

FIGURE 1.9

Modification des précipitations régionales : concordance entre plusieurs modèles



Dans la figure 1.9, les modèles et les expériences sont les mêmes que dans la figure 1.8 Les régions sont classées selon qu'on y constate un accord sur un accroissement moyen des précipitations de plus de 20 % (« forte augmentation ») ; compris entre 5 % et 20 % (« faible augmentation ») ; compris entre - 5 % et + 5 % (« pas de changement ») ; une diminution comprise entre - 5 % et - 20 % en moyenne (« faible décroissance ») ; une diminution d'au moins - 20 % en moyenne (« forte diminution ») ; ou un désaccord (« signes non concordants »). La définition de l'accord est la même que pour la figure 1.8.

Sources

IPCC, 2001, p. 601 (chapitre 10, encadré1, fig. 2) ;

GIEC, 2002, Résumé technique, p. 67 (fig. 23).

C'est sous les hautes latitudes que la convergence entre les modèles paraît la plus grande. Ceci peut paraître contradictoire avec le diagnostic souvent évoqué : dans un climat plus chaud, les régions humides le seront un peu plus, les régions sèches également, et l'impact sera le plus grand dans les régions de basse latitude.

Mais, dès que l'on évoque la régionalisation des variations de précipitation, les convergences entre les modèles se heurtent à un problème : selon les régions, la précipitation évolue vers une augmentation ou une diminution. Le fait que tous les modèles montrent qu'en moyenne les précipitations seront plus fortes près de l'Equateur ne signifie pas qu'il y aura un accord entre modèles sur une région plus petite, comme l'Afrique de l'Ouest ou l'Amérique du Sud. Dès que l'échelle considérée est trop petite, les modèles divergent. Cela est plus marqué dans les régions de basse latitude — où le dérèglement climatique peut entraîner des déplacements de structures climatiques difficiles ou impossibles à prévoir. C'est paradoxalement sous des latitudes moyennes que la réponse climatique, quoique moins forte, apparaît aussi plus cohérente, marquée par une augmentation générale des précipitations.

Cette difficulté à établir un pronostic fiable dans les régions probablement les plus vulnérables aux changements climatiques caractérise la nature du risque climatique, très largement imprévisible.

Conclusion

La réalité du changement climatique futur est aujourd'hui solidement étayée par les travaux du GIEC. Les changements récents de notre environnement global, en particulier le réchauffement observé depuis plusieurs décennies à l'échelle de la planète, ou les phénomènes qui peuvent y être associés directement (fonte des glaciers de mon-

tagne et de la banquise) apparaissent désormais avec quasi-certitude comme les premières manifestations du changement à venir.

Cette certitude mieux ancrée de la communauté scientifique constitue un phénomène récent. La nature des éléments nécessaires pour prendre les décisions adéquates s'en trouve renouvelée. Certaines interrogations deviennent ainsi plus pressantes et nécessitent de mener de nouveaux travaux de recherche. La liste qui suit en donne quelques exemples.

Il y a encore dix ans, établir la réalité du risque climatique constituait le questionnement principal. Celui-ci s'est déplacé vers la nécessité d'une vision affinée de quand, comment et avec quelle amplitude celui-ci va se produire. A cet égard, il devient possible d'utiliser les données du passé proche, en particulier des vingt dernières années, pour mieux évaluer les modèles et, éventuellement, réduire le spectre encore assez large des futurs possibles.

La part des différents gaz à effet de serre — dont certains ne sont pas pris en compte par le protocole de Kyoto — dans le forçage radiatif, le rôle des puits éventuels de carbone et de méthane restent des points insuffisamment tranchés, alors que des connaissances précises sont nécessaires pour pouvoir légiférer correctement dans ces domaines.

L'écart entre l'évolution de la concentration de certains gaz à effet de serre dans l'atmosphère et les prévisions reste à éclaircir (par exemple pour le méthane). Bien que nous disposions d'outils nouveaux (données satellitaires, modèles), les études sur ce sujet demeurent peu nombreuses.

Par ailleurs, les réflexions sur l'après-2100 demeurent toujours très insuffisantes. Elles nécessitent un effort de recherche important. L'éventualité d'événements catastrophiques (fonte partielle de l'Antarctique, modification brutale et irréversible de la circulation nord-atlantique, libération du méthane contenu dans le pergélisol) nous renvoie à un futur un peu plus lointain (fin du XXIe siècle, XXIIe siècle), mais aussi à l'exemple d'un passé ancien qui permet d'observer les mécanismes selon lesquels certaines de ces manifestations ont pu avoir lieu. A cette échelle de temps, les prévisions sont très incertaines : pourtant, il pourrait s'agir de catastrophes majeures, résultant directement du comportement actuel de l'humanité.

Il est également important de parvenir à saisir ces changements climatiques dans le cadre plus large des problèmes qui seront posés à la planète dans les années à venir. Ainsi, il existe un lien fort entre les actions anthropiques susceptibles de modifier le climat et celles affectant par exemple l'usage des sols, la gestion de l'eau ou la biodiversité — que ce soit au niveau des déterminants (par exemple la démographie) ou des conséquences. Là aussi un effort de recherche est nécessaire.

La variabilité climatique, le réchauffement anthropique et le processus du GIEC

Michael Ghil

Michael Ghil est professeur des sciences de la planète, directeur du département Terre - Atmosphère - Océan, et responsable de la plate-forme Environnement à l'Ecole normale supérieure à Paris. Ses travaux portent sur la dynamique de l'atmosphère, des océans et du climat à des échelles de temps qui s'étendent des jours aux millénaires. Il a été l'un des évaluateurs externes des trois rapports du GIEC (groupe 1).

Le processus mis en œuvre par le GIEC et les trois rapports qui l'ont ponctué ont joué un rôle de première importance dans l'évolution des études sur le climat pendant la dernière quinzaine d'années. Ce processus a mobilisé des dizaines de spécialistes comme auteurs principaux de divers chapitres et des centaines comme contributeurs ou évaluateurs indépendants. Cet effort massif a donc fait avancer, mais a aussi biaisé nos connaissances sur l'évolution du climat sous les effets des forçages naturels et anthropiques.

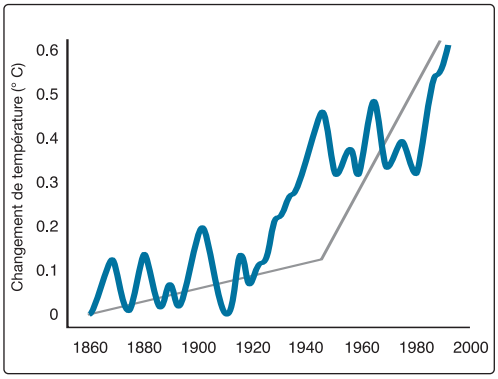
Pour poser les jalons de notre propos, le système climatique est d'une énorme complexité, dans les éléments qui le composent — atmosphère, océan, surface continentale, neige et glace, biosphère marine et continentale —, dans les processus physiques et chimiques internes à chacun d'entre eux et ceux qui relient les divers éléments ainsi que les échelles de temps et d'espace auxquelles se produisent les phénomènes que ces processus engendrent. Les travaux du GIEC se sont concentrés sur des échelles d'espace globales ou continentales et sur des échelles de temps allant des décennies aux siècles. Ceci a fait progresser nos connaissances, surtout sur les processus agissant à ces échelles, comme par exemple la circulation thermohaline des océans. En poursuivant le but de déceler les effets anthropiques sur l'évolution climatique, comme la modification de l'effet de serre, l'étude des cycles biogéochimiques, assez peu connus et compris précédemment, a aussi été privilégiée.

En revanche, la concentration du « faisceau lumineux » de la démarche du GIEC sur ces échelles et processus a conduit à négliger jusqu'à maintenant, par nécessité, les processus et les effets qui agissent à des échelles plus courtes et plus petites. Or, non seulement ceux-ci interagissent avec les échelles sur lesquelles se focalisent les études du GIEC, à cause de la forte non-linéarité du système climatique, mais ils jouent un rôle primordial dans la distribution statistique des phénomènes climatiques qui affectent beaucoup plus la vie quotidienne qu'un faible changement de température hémisphérique. Des événements climatiques rares et extrêmes — comme la canicule de l'été dernier en France — ne résultent pas simplement d'une légère augmentation de la température moyenne de l'hémisphère Nord depuis le début de l'ère industrielle, mais aussi de l'interaction de cette augmentation avec une variabilité naturelle, à l'échelle des saisons et d'une année à l'autre, qui est beaucoup plus forte et plus irrégulière que le changement climatique moyen interdécennal.

Pour cerner cette interaction compliquée entre les petits changements climatiques aux grandes échelles de temps et d'espace et la forte variabilité naturelle, il est nécessaire de mettre en œuvre tout l'arsenal du chercheur en sciences de la planète. Cet arsenal comporte les observations les plus diverses — des enregistrements paléoclimatiques aux

données satellitaires, en passant par les données instrumentales « classiques » —, une hiérarchie de modèles allant des plus simples et idéalisés jusqu'aux modèles couplés océan-atmosphère-cryosphère-biosphère (MCG) et, afin de comparer toutes ces observations et modèles, des outils statistiques de plus en plus performants (Ghil & Le Treut, 1999). La focalisation du GIEC sur l'échelle interdécennale, tout comme le caractère collectif et normatif de ses travaux, ont favorisé des simulations de modèles couplés MCG selon des scénarios prescrits d'émissions de gaz à effet de serre ainsi que l'utilisation d'observations instrumentales classiques ou de compilations plus ou moins consensuelles de données indirectes sur le dernier millénaire.

De grands progrès ont été effectués dans la simulation du climat du XXe siècle, ainsi que dans l'élaboration d'un consensus sur la fourchette, encore très large, des changements climatiques à espérer (dans le sens mathématique du mot) au XXIe siècle. Mais ces progrès nous laissent quand même face à deux types de questions fondamentales.



Comparaison schématique entre la variabilité naturelle observée (en trait continu épais) et le changement climatique dû au forçage anthropique (en trait continu fin), pour l'hémisphère Nord, depuis l'existence de données instrumentales pour la température (Ghil, 2002 a).

La première question est posée par la figure ci-contre. Cette figure montre le type de changement de température moyenne auquel on devrait s'attendre suite à l'augmentation d'origine anthropique de la concentration atmosphérique en gaz à effet de serre (trait fin). En effet, une augmentation exponentielle de la teneur atmosphérique en CO_2 devrait se traduire par une augmentation linéaire de la température globale moyenne (Dickinson & Cicerone, 1986). Mais la figure montre aussi la variabilité observée au moyen de mesures instrumentales (trait épais), qui n'est point uniforme et loin d'être aussi lisse que celle qui résulterait uniquement du forçage anthropique. Il s'agit donc d'expliquer comment la variabilité naturelle engendre la différence entre les deux traits dans la figure (Ghil, 2002 a, b).

La deuxième question qui subsiste est celle de la variabilité aux échelles plus courtes encore que celles visibles dans la variabilité observée, reproduites schématiquement dans la figure ci-dessus. Il s'agit de phénomènes de variabilité atmosphérique dite de basse fréquence, c'est-à-dire d'une durée de 10 à 100 jours, et de leur interaction avec la variabilité interannuelle. Celle-ci a lieu, en particulier, à travers l'interaction de l'atmosphère avec l'océan, par des flux de masse, de chaleur et de moment cinétique. Le résultat de ces interactions est double : d'une part, une modification de la distribution statistique des phénomènes atmosphériques de basse fréquence, conduisant à ce que l'on appelle souvent les anomalies persistantes, dont les événements extrêmes ; d'autre part, la rétroaction de ces anomalies sur la circulation océanique, qui contribue à la variabilité climatique interannuelle et interdécennale. Au vu de la forte non-linéarité du système climatique, effectuer la moyenne des effets relativement rapides sur la période de temps couvrant les phénomènes plus lents est loin d'être évident.

Ces deux questions, surtout la seconde, n'ont pas reçu toute l'attention qu'elles méritent au sein du GIEC. Il est de la première importance que la communauté scientifique française s'engage dans les recherches nécessaires pour y répondre. Des décisions socio-économiques importantes à l'horizon 2050 et 2100 en dépendent.

La modélisation : un outil central dans l'expertise du GIEC

Hervé Le Treut

Hervé Le Treut est physicien, ancien élève de l'Ecole normale supérieure de Paris. Directeur de recherche au CNRS, il dirige le Laboratoire de météorologie dynamique et enseigne à l'Ecole polytechnique. Il fait partie des principaux rédacteurs des rapports du groupe 1 du GIEC.

Les modèles numériques jouent un rôle clef dans le dossier de l'effet de serre, puisqu'il s'agit du seul outil qui permette d'évaluer ce que seront les climats futurs : l'analogie avec les climats des époques passées qui ont pu connaître des niveaux de CO_2 différents, l'extrapolation vers le futur des données climatiques recueillies au cours du XXe siècle fournissent certes des indications précieuses, mais qui ne peuvent être interprétées qu'à l'aide de modèles physiques.

Pourtant la notion de modèle reste mal comprise hors du milieu scientifique. Les aspects, souvent techniques, développés dans le rapport du GIEC, qui témoignent des progrès réalisés par les modèles numériques, n'ont pas empêché que se développent des débats souvent mal informés sur la validité de ces outils et leur manque éventuel de « réalisme ».

Un modèle est une représentation volontairement simplifiée du monde réel qui est utilisée parce qu'elle permet de mieux appréhender celui-ci, et éventuellement d'en prédire certains aspects : parler de « réalisme » ne peut donc se faire que si l'on a précisé clairement les hypothèses sur lesquelles repose un modèle.

Ainsi, c'est bien un modèle simple du bilan radiatif de la planète qui fournit l'argument principal concernant le rôle climatique des gaz à effet de serre, argument qui était déjà celui d'Arrhénius au début du XXe siècle : il est possible de calculer une température « réaliste » de la surface de la planète en prenant en compte l'absorption du rayonnement infrarouge émis par le sol continental ou la surface des océans par les gaz tels que la vapeur d'eau, le dioxyde de carbone ou le méthane. Ce modèle a une valeur prédictive simple : si la quantité de dioxyde de carbone augmente, la température du sol augmente elle aussi. Bien sûr, ce modèle n'est pas parfaitement réaliste : par exemple il ne rend pas compte des variations de la température en divers points du globe, ni du transport d'énergie par l'atmosphère ou l'océan.

Une grande partie du travail de la communauté scientifique a donc consisté à obtenir des modèles toujours plus « réalistes » prenant en compte un nombre croissant de processus et prédisant aussi un nombre toujours plus grand de paramètres vérifiables.

Si l'on devait retenir deux faits essentiels de cette longue quête que constitue la mise au point des modèles, ce sont sans doute les suivants. Le premier est qu'un pari immense a été gagné, parce que les modèles les plus complexes, qui incluent le plus grand nombre de processus, sont désormais ceux qui fournissent le meilleur accord avec la réalité. Sous le seul effet de lois physiques, les modèles numériques sont caractérisés par la présence d'alizés, de dépressions, d'anticyclones, de tempêtes d'ouest, d'épisodes El Niño, de fluctuations saisonnières, etc., qui sont de plus en plus semblables à ceux de la planète réelle. Le second est que, malgré leur complexité croissante, les modèles ne remettent pas en cause la prévision des modèles simples : un doublement de la

teneur atmosphérique en dioxyde de carbone y est toujours associé à un réchauffement de quelques degrés.

Les modèles peuvent ainsi être considérés comme un instrument permanent d'analyse et éventuellement de réfutation des critiques qui surgissent dans le débat sur les variations climatiques. Cet instrument fournit un cadre d'argumentation fortement contraint : par les lois de la conservation de la masse, de l'énergie, de la quantité de mouvement, du moment cinétique. Chaque fois qu'une idée nouvelle surgit pour expliquer que les « choses ne sont pas si simples », le modèle fournit un cadre rigoureux permettant de la tester. Il n'en est donc que plus remarquable de constater la permanence des conclusions établies il y a plusieurs décennies sur la base d'une représentation physique très simple de la planète. Certes, les modèles ne sont pas, ne seront jamais parfaitement réalistes. La physique des nuages fournit un exemple de processus dont la représentation incertaine affecte fortement la quantification des effets climatiques en réponse à une augmentation donnée des gaz à effet de serre. L'essentiel est néanmoins que différentes hypothèses de formation des nuages aient pu être testées et conduisent à une fourchette de résultats bien documentés. C'est la continuité de cette démarche qui permet d'avoir une confiance forte dans l'inévitabilité d'un changement climatique en cas de poursuite des émissions des gaz à effet de serre.

En conclusion, certains voient dans les modèles un objet magique rendant une réponse difficile à contester, difficile à comprendre et qui peut être imposée aux décideurs ou aux citoyens de manière quasi dictatoriale par la communauté scientifique. Certes, le risque d'un détournement du rôle et du sens des modèles existe toujours. Mais, dans le principe comme dans le cadre des études décrites par le rapport du GIEC, les modèles ont au contraire permis à une variété d'hypothèses ou d'approches de s'exprimer dans un cadre vérifiable et strictement déterminé.

La description des incertitudes

Michel Petit

Chercheur en physique de l'atmosphère, Michel Petit a été directeur de l'Institut national de sciences de l'univers, puis directeur général adjoint pour la recherche de l'Ecole polytechnique. Il a représenté la France au bureau du GIEC de 1992 à 2002. Il est président de la Société météorologique de France et vice-président du comité Environnement de l'Académie des Sciences.

La science est au service de l'environnement lorsqu'elle permet de prévoir le risque d'événements qui ne se concrétiseront que dans un futur plus ou moins éloigné, alors qu'aucun signe perceptible par tous ne vient corroborer ces craintes. De telles prédictions se heurtent tout d'abord au scepticisme général. Cette réaction est partiellement explicable par la tendance coupable de certains scientifiques à attirer l'attention sur eux ou au moins sur leur discipline, en présentant aux médias les conséquences de leurs travaux sous un jour dramatique. Ils n'en reste pas moins que certains avertissements, comme ceux relatifs au changement climatique, sont sérieusement fondés et, lorsqu'ils auront été confirmés par les faits, on reprochera durement aux décideurs de ne pas avoir tenu compte des avis scientifiques.

Les décideurs sont non seulement les hommes politiques ou les dirigeants d'entreprises, mais aussi les citoyens qui les élisent ou qui choisissent d'acheter leur production. La première réaction de tous ces décideurs est de s'interroger sur le crédit qu'il faut accorder aux innombrables mises en garde qui pleuvent de toutes parts. Le GIEC constitue une forme d'expertise scientifique collective originale qui a su trouver un mode de fonctionnement transparent donnant des garanties sérieuses d'objectivité. Les scientifiques sont confiants dans le double processus d'expertise critique auquel est soumis chacun des chapitres du rapport. Les gouvernements, à travers le bureau du GIEC, choisissent les auteurs de tous les chapitres et approuvent *in fine* le rapport et tout particulièrement les résumés à l'intention des décideurs de chacun des trois tomes, qui sont acceptés mot à mot.

Le changement climatique est inquiétant à cause de son évolution à l'échelle de quelques décennies, qui est largement déterminée par nos émissions passées et présentes, et plus encore par son évolution à l'échelle du siècle, si l'humanité ne réussit pas à maîtriser rapidement la totalité de ses émissions qui ne cessent de croître. Les études scientifiques les plus pertinentes sont donc celles qui visent à estimer ce que deviendront les phénomènes climatiques au cours du présent siècle et des siècles suivants. Les projections qu'on peut déduire des modélisations ne sont malheureusement pas exemptes d'incertitudes. En effet, on ne peut que faire des hypothèses sur l'évolution démographique, la répartition du développement économique dans le monde, l'évolution des technologies ou celle des comportements humains. Par ailleurs, on ne sait simuler que de manière imparfaite l'ensemble des phénomènes qui régissent l'évolution du climat au moyen d'ordinateurs. Il en va de même des conséquences des variations climatiques et des possibilités de réduire les émissions de l'humanité. Il importe donc de décrire les incertitudes qui affectent ces projections en des termes compréhensibles pour les non-spécialistes que sont en général les décideurs de toute sorte.

Durant la préparation du troisième rapport d'évaluation du GIEC, on a tenté de définir une échelle des incertitudes fondée sur des probabilités subjectives attribuées collectivement par consensus entre les auteurs concernés. Il peut s'agir de la probabilité d'un résultat. Il en va ainsi lorsque le groupe 1 écrit : « La plupart du réchauffement observé au cours des trente dernières années est vraisemblablement due à l'accroissement des concentrations des gaz à effet de serre », avec une note en bas de page rappelant que « vraisemblablement » signifie par convention, compris entre 66 et 90 % de chances. Il peut aussi s'agir de la confiance accordée à une modélisation. Il en va ainsi quand le groupe 2 du GIEC écrit, pour un faible changement climatique, que : « D'après les modèles économiques, les impacts du changement climatique sur la production et les prix agricoles seront des changements dans le revenu moyen (faible confiance), avec de grands accroissements dans la plupart des régions développées et des augmentations plus faibles ou des diminutions dans les pays en développement ». Une note en bas de page précise que « faible confiance » signifie par convention une confiance située entre 5 et 33 %. Dans ce cas, la probabilité est clairement attachée au modèle et non à son résultat. Le message n'est pas que la probabilité d'un changement faible est de 5 à 33 % et que la probabilité d'un grand changement est en conséquence de 66 à 95 %. Le message est que le modèle qui fournit ce résultat a une probabilité faible (5 à 33 %) de décrire correctement la réalité. Si le modèle est faux, on ne sait rien de ce qui peut se passer et le résultat prédit peut aussi bien se produire que son contraire. Ce message du groupe 2 signifie donc qu'il y a au moins une probabilité de 5 à 33 % pour que le résultat du modèle soit juste. La situation est la même avec les prévisions météorologiques à quelques jours de la télévision française auxquelles ont attribue un indice de confiance allant de 1 à 5. En effet, si on prévoit avec un indice de confiance de 2 que le prochain week-end sera ensoleillé, cela ne veut pas dire que la probabilité d'un temps clair sera d'environ 30 % et celle d'un temps couvert de 70 %, mais que la probabilité d'avoir du soleil est supérieure à 30 %.

Les décideurs et tous les non-spécialistes préfèrent certainement qu'une probabilité soit attachée au résultat plutôt qu'au modèle. Néanmoins, les résultats les plus importants sont ceux qui concernent l'avenir et, dans tous les cas, ils sont fournis par des modèles. Les scientifiques peuvent évaluer subjectivement la confiance qu'ils ont dans leur modèle sans doute plus facilement que celle qu'ils ont dans ses résultats. Evidemment, si le degré de confiance accordé au modèle est grand, il en va de même de celui accordé à son résultat. Cependant, des conséquences graves possibles sont certainement dignes d'être prises en compte, même si on n'est pas certain de la validité du modèle qui les projette et il importe alors de bien préciser de la probabilité de quoi on parle.

Dans de nombreux cas, les scientifiques sont incapables d'exprimer leurs incertitudes en termes de probabilité. C'est ainsi que le groupe 3 du GIEC décrit les incertitudes sur l'estimation des coûts et des bénéfices des mesures de mitigation des émissions de façon explicite : « Les deux approches (du bas vers le haut et du haut vers le bas) conduisent à des différences dans les estimations des coûts et des bénéfices qui se sont réduites depuis le SAR (deuxième rapport du GIEC). Même si ces différences étaient résolues, d'autres incertitudes demeureraient. L'impact possible de ces incertitudes peut être utilement évalué en examinant l'effet d'un changement de chacune des hypothèses faites sur les coûts agrégés calculés, à condition que toute corrélation entre variables soit prise en compte ». Une telle assertion peut être jugée comme décevante par les non-spécialistes, mais elle exprime précisément la réalité des incertitudes scientifiques dans ce cas. C'est une

dure réalité de la vie dont il faut bien s'accommoder, même si ces incertitudes incontournables ne facilitent pas les prises de décisions. Au demeurant, aucune décision politique n'est jamais prise sans avoir à faire l'impasse sur un certain nombre d'inconnues.

Pour le quatrième rapport d'évaluation du GIEC, « Incertitudes et gestion des risques » a été retenu comme l'un des thèmes transversaux importants. La conclusion du document préparatoire à ce propos* peut se résumer ainsi. Le traitement des incertitudes dans le troisième rapport était en progrès par rapport aux rapports antérieurs. Compte tenu de cette expérience et de nouveaux travaux récemment publiés, il devrait être possible d'améliorer la présentation des incertitudes. L'approche dépendra du sujet et de la nature des résultats de recherche disponibles, ce qui implique une certaine souplesse dans les diverses approches des incertitudes. Cependant, une cohérence est souhaitable pour les sujets qui appellent une synthèse des résultats de diverses disciplines ou des divers groupes de travail du GIEC. Un équilibre optimal devra être recherché entre souplesse et cohérence dans le traitement des incertitudes. Cela sera fait en consultation avec les futurs utilisateurs du rapport de façon à éviter tout malentendu et faciliter l'approbation du rapport en assemblée plénière.

* Que j'ai rédigée avec Martin Manning, disponible en anglais sur le site de l'IPCC : www.ipcc.ch

Comment le débat scientifique a fait progresser l'expertise sur les rétroactions atmosphériques

Sandrine Bony

Sandrine Bony est chercheur au CNRS et membre du Laboratoire de météorologie dynamique à Paris. Elle étudie les mécanismes physiques impliqués dans les rétroactions nuages et vapeur d'eau à partir d'analyses, d'observations satellitaires et de modèles numériques. Elle est auteur contributeur du chapitre 7 du troisième rapport du GIEC (groupe 1).

L'ampleur du changement climatique induit par une perturbation telle que l'augmentation des gaz à effet de serre dépend de la façon dont le climat amplifie ou atténue l'effet de cette perturbation. Les processus amplificateurs ou atténuateurs sont appelés rétroactions. Parmi eux, les réponses de la vapeur d'eau et des nuages à une variation de température jouent un rôle crucial. Ainsi, les modèles climatiques indiquent que l'augmentation de l'humidité atmosphérique induite par la perturbation anthropique des gaz à effet de serre double le réchauffement de la planète. On comprend alors que la qualité des prédictions du changement climatique dépende de la capacité des modèles à représenter les processus de rétroaction. Si la réponse de la vapeur d'eau au réchauffement produit une rétroaction positive dans tous les modèles, la réponse des nuages produit une rétroaction de signe et d'amplitude très variables selon les modèles. Il en résulte que tous les modèles prédisent un réchauffement global, mais que l'ampleur de celui-ci varie considérablement d'un modèle à l'autre.

La question du signe et de l'amplitude des rétroactions nuages et vapeur d'eau est l'objet de vives polémiques dans la communauté scientifique. Celles-ci sont suscitées en particulier par les arguments controversés de Richard Lindzen, professeur au Massachussets Institute of Technology et l'un des auteurs principaux du troisième rapport du GIEC. En 1990 déjà, il bousculait la vision consensuelle de la rétroaction vapeur d'eau en proposant que cette rétroaction puisse être rendue négative par le comportement (mal connu à l'époque) de la vapeur d'eau dans la haute troposphère et en prétendant que les modèles climatiques n'étaient pas à même d'en rendre compte convenablement. Lors de la rédaction du TAR il émettait, avec M. D. Chou et A. Hou, une nouvelle controverse : la modification, dans un climat plus chaud, des processus microphysiques qui contrôlent la précipitation des cumulonimbus serait susceptible de réduire la superficie des régions humides et nuageuses dans les tropiques ; en laissant la terre rayonner plus efficacement sa chaleur vers l'espace, l'ampleur du réchauffement climatique serait atténuée. De nouveau, il mettait en doute la capacité des modèles à simuler ce type de rétroaction.

Rien de plus naturel, dans l'exercice de la recherche, que de reconnaître et de souligner les limites de notre compréhension physique d'un phénomène. Il s'agit d'un moteur essentiel de la recherche. Toutefois, un caractère remarquable des controverses lancées par Lindzen est qu'elles ont largement dépassé la sphère du débat scientifique sur les rétroactions. En servant d'arguments à ceux qui défendent l'idée que les prévisions du climat ne sont pas fiables, elles sont devenues un enjeu politique.

Le groupe de travail chargé de rédiger l'expertise sur les rétroactions nuages et vapeur d'eau pour le troisième rapport du GIEC était composé d'une quinzaine de scientifiques impliqués dans l'étude de ces rétro-

actions par différentes approches (observation, modélisation, théorie). La rédaction du rapport a été ponctuée de vives discussions autour de la physique des rétroactions entre nuages et vapeur d'eau et de ses implications pour l'évaluation des tests expérimentaux et de la crédibilité des modèles.

Si les bases physiques des processus de rétroaction entre nuages et vapeur d'eau ont fait l'objet de divergences, cela a souvent été à cause d'une actualisation incomplète des connaissances acquises dans le domaine. A cet égard, les interactions entre participants ont permis d'aboutir à une synthèse efficace et consensuelle de l'état de la compréhension physique des rétroactions. En particulier, il est apparu que la sensibilité à la température de la microphysique des nuages convectifs pouvait jouer un rôle critique dans ces rétroactions et qu'il était donc nécessaire de la mesurer et de mieux la représenter dans les modèles.

En comparaison, le débat sur la crédibilité des modèles climatiques a été plus vif. En effet, le groupe de travail était composé de personnalités aux opinions extrêmes sur le sujet. Ainsi, la similarité de la rétroaction vapeur d'eau entre les modèles était considérée comme un gage de confiance pour certains et comme un gage de suspicion pour d'autres. Pour faire avancer le débat, les modérateurs ont imposé de fonder le plus possible l'argumentation en faveur ou en défaveur des modèles sur des critères physiques : les modèles sont-ils capables de reproduire les processus physiques que l'on pense être impliqués dans ces rétroactions ? Il s'agissait donc de répondre à la question : « Pourquoi devons-nous (ou pas) croire aux résultats des modèles ? ». En se demandant si les différents diagnostics de comparaison d'un modèle avec les observations parues dans la littérature sont pertinents pour évaluer les processus de rétroaction et si, d'un point de vue physique, les mécanismes de rétroaction pourraient être significativement différents de ceux suggérés par les modèles actuels.

A coup d'argumentations physiques rigoureuses et sans concessions, cette démarche a permis de réduire la part de subjectivité des jugements personnels et d'aboutir à une évaluation argumentée et relativement consensuelle des modèles. Ainsi, il a été conclu que les processus identifiés comme contribuant à la rétroaction vapeur d'eau sont raisonnablement simulés par les modèles. En revanche, il est difficile, voire impossible, d'évaluer la capacité des modèles à simuler des processus que l'on comprend mal ou que l'on ne sait pas encore observer. De ce fait, l'évaluation du signe et de l'amplitude des rétroactions nuageuses est encore balbutiante à l'heure actuelle.

Comme l'illustre la relecture des rapports successifs du GIEC depuis 1990, l'expertise de la performance des modèles dépend fondamentalement de l'état de compréhension du climat : les diagnostics d'évaluation des rétroactions dans les modèles sont d'autant plus pertinents que les processus physiques contrôlant ces rétroactions sont bien compris. Une controverse scientifique bien posée et reposant sur une bonne connaissance du domaine est en général très constructive pour la recherche. Les controverses amorcées par Lindzen appartiennent à cette catégorie et ont grandement contribué à améliorer la qualité de l'expertise sur la rétroaction vapeur d'eau depuis 1990.

Il est probable que la dernière controverse lancée par Lindzen, Chou et Hou contribuera à accroître encore la pertinence de la prochaine expertise du GIEC dans le domaine des rétroactions entre nuages et vapeur d'eau. Les controverses sur la capacité des modèles climatiques à simuler la rétroaction vapeur d'eau ont contribué, à l'issue du troisième rapport, à rendre les modèles climatiques plus crédibles sur ce point. Cet exemple illustre l'intérêt du débat scientifique pour l'expertise sur le changement climatique.

Incertitude de l'amplitude du changement climatique liée aux rétroactions entre le climat et le cycle du carbone

Pierre Friedlingstein

Pierre Friedlingstein est chercheur au CNRS et membre du Laboratoire des sciences du climat et de l'environnement à Saclay. Spécialiste de la modélisation des cycles biogéochimiques et de leurs interactions avec le système climatique, il est auteur contributeur du chapitre 3 du troisième rapport du GIEC (groupe 1).

La méthodologie du troisième rapport du GIEC pour estimer le changement climatique peut se décomposer en trois étapes : d'abord, définir des scénarios économiques d'évolution future des émissions de gaz à effet de serre ; puis, utiliser des modèles biogéochimiques, tels les modèles du cycle du carbone, afin d'établir les scénarios de concentrations atmosphériques futures de ces gaz à effet de serre ; enfin, utiliser des modèles de circulation générale forcés par ces scénarios de concentration pour estimer le changement climatique futur.

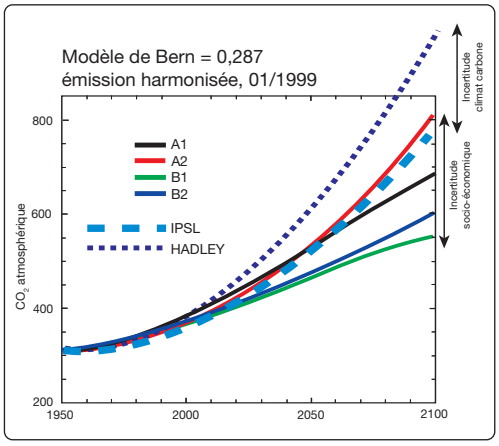
Typiquement, cette méthodologie ne prend pas en compte les rétroactions que le changement climatique peut avoir sur le monde économique ou sur les cycles biogéochimiques. Pour prendre l'exemple du cycle du carbone, le chapitre 3 du rapport du GIEC traite du cycle du carbone et le chapitre 9 du changement climatique. L'impact du changement climatique sur le cycle du carbone est traité à la fin du chapitre 3, son *feedback* sur le changement climatique est rapidement approché à l'aide de modèles simplifiés du climat et du cycle du carbone. Dans le chapitre 9, les études récentes de simulations couplées climat-carbone à l'aide de modèles de circulation générale sont uniquement mentionnées (Cox *et al.*, 2000, Dufresne *et al.*, 2002).

Le dioxyde de carbone (CO_2) est émis par combustion de réserves fossiles ou de biomasse. A l'heure actuelle, environ la moitié du CO_2 émis subsiste dans l'atmosphère, le reste étant réabsorbé par les océans et les continents. Les mécanismes responsables de ces puits océaniques et biosphériques font intervenir des processus biogéochimiques : photosynthèse, export de matière organique et reminéralisation pour la partie océanique ; photosynthèse, mortalité et décomposition de la matière organique pour la partie continentale. Tous ces processus dépendent directement du climat. Il est donc raisonnable de penser que la fraction du CO_2 émis restant dans l'atmosphère peut évoluer dans le futur si l'efficacité de ces mécanismes de puits ne reste pas constante.

Deux études récentes, mais néanmoins antérieures au troisième rapport du GIEC, ont mis en évidence la sensibilité de ces mécanismes au changement climatique et donc l'importance potentielle du couplage entre le cycle du carbone et le système climatique. L'une a été effectuée par l'équipe anglaise du Hadley Centre et l'autre par l'équipe française de l'Institut Pierre-Simon Laplace (IPSL). Ces deux études présentent de nombreuses similitudes tant par la méthodologie que par les résultats. Les deux groupes couplent un modèle de circulation générale à un modèle du cycle du carbone afin d'étudier le couplage climat-carbone, lorsque ces modèles sont forcés par un scénario d'émission de CO_2 – et non de concentration de CO_2, comme c'est le cas habituellement. Les deux études montrent que le changement clima-

tique diminue la capacité d'absorption des puits de carbone, et principalement des puits continentaux. Elles concluent que, pour un scénario d'émission donné, la concentration en CO_2 atmosphérique en 2100 — et donc le changement climatique associé — est plus importante lorsque le climat rétroagit sur le cycle du carbone.

Si les résultats qualitatifs de ces deux études sont semblables, il n'en est pas de même des résultats quantitatifs. Le modèle du Hadley Centre simule un changement drastique : la biosphère continentale se comporte comme un puits de CO_2 au cours du XXe siècle et au début du XXIe siècle, mais devient une source après 2050. Ce changement est principalement dû au réchauffement des sols qui active la décomposition de la matière organique et entraîne un dégagement important de CO_2. Au lieu d'absorber le CO_2 émis par l'homme, la biosphère future relâche dans l'atmosphère le carbone des sols. En 2100, le modèle du Hadley Centre simule une concentration atmosphérique de 980 ppmv alors que ce modèle, en l'absence de cette rétroaction de la biosphère simule une concentration de 700 ppmv. Le modèle de l'IPSL simule aussi une forte réduction de la capacité future de la biosphère continentale à « pomper » le CO_2 anthropique. Néanmoins, le modèle de l'IPSL ne simule pas une source nette biosphérique. La concentration simulée en 2100 est donc moins extrême que celle du modèle du Hadley Centre, elle atteint 780 ppmv en mode couplé climat-carbone (au lieu de 700 ppmv lorsque le climat n'affecte pas le cycle du carbone).



Concentrations de CO_2 pour certains scénarios du SRES

Cette figure représente les concentrations de CO_2 pour les scénarios du SRES – A1, A2, B1 et B2 – estimés par le modèle de Bern (ne prenant pas en compte l'impact du climat sur le cycle du carbone). Les courbes bleues montrent les concentrations de CO_2 simulées par les modèles climat-carbone de l'IPSL (tireté) et du Hadley Centre (pointillé) (Friedlingstein *et al.*, 2003).

Ces deux études montrent qu'il existe une forte incertitude liée à l'effet du changement climatique sur le cycle du carbone. Deux modèles donnant des concentrations de CO_2 similaires en mode non couplé arrivent à des différences de 200 ppmv lorsque les cycles du carbone deviennent dépendants du climat. Cette nouvelle incertitude sur les concentrations futures de CO_2 et donc sur le changement climatique, est considérable. Elle est du même ordre de grandeur que l'incertitude sur la future concentration en CO_2 due au choix d'un scénario d'émission (voir figure ci-contre). A l'heure actuelle, nous ne sommes pas en mesure de déterminer lequel de ces deux modèles est le plus réaliste. Nous sommes en effet fortement limités par le manque de données susceptibles de mieux contraindre la réponse des modèles de carbone au changement climatique. D'autres groupes vont réaliser des simulations climatiques similaires, ce qui permettra sans doute, via un spectre plus large de réalisations, de mieux appréhender les principaux mécanismes qui contrôlent la réponse du système couplé climat-carbone.

Impacts, adaptation et vulnérabilité

Jean-Pascal van Ypersele, Stéphane Hallegatte, Shardul Agrawala et Annett Moehner

Dans le troisième rapport du GIEC, le groupe 2 a étudié plusieurs questions fortement interdépendantes : les impacts des changements climatiques actuels et à venir, impacts directs et différés sous forme de réactions des systèmes naturels et humains ; l'adaptation de ces systèmes aux effets principalement défavorables des changements climatiques ; la vulnérabilité, enfin, qui représente la sensibilité d'un système, voire son incapacité à faire face aux effets néfastes des changements climatiques. La vulnérabilité est fonction de la nature, de l'ampleur et du rythme de la variation du climat à laquelle le système considéré est exposé, de la sensibilité de ce système et de sa capacité d'adaptation.

Ces problématiques posent de multiples difficultés. Elles nécessitent l'apport de nombreuses disciplines (physique, chimie, biologie, sciences sociales...) et l'existence de données de qualité et en nombre suffisant pour représenter correctement les disparités aux échelles régionales et sous-régionales. Ceci concerne en particulier les liens entre les modifications du climat et les évolutions de certains systèmes naturels et humains au cours des dernières décennies. Or, la nature des données disponibles (séries temporelles, couverture géographique, sujets traités...) varie considérablement d'une grande région du monde à une autre. Par ailleurs, les incertitudes relatives aux impacts régionaux des changements climatiques sont encore plus fortes et d'origine plus variée que celles relatives aux changements climatiques globaux. En outre, les projections traitant des impacts des changements climatiques sur les systèmes sociaux et économiques — habitat, énergie, industrie, assurance, santé... — sont plus incertaines que celles qui concernent les systèmes naturels et humains — ressources en eau, éco-

systèmes marins... Il en est de même pour la capacité des sociétés et des systèmes à s'adapter aux effets néfastes des changements climatiques. Or, pour être utiles, les projections des impacts doivent se situer à des échelles infrarégionales.

Ces difficultés ont conduit les auteurs du rapport à préciser la nature et le degré des incertitudes rencontrées de deux manières différentes.

L'une évalue la confiance en une conclusion selon une échelle de probabilités — la probabilité qu'un événement se produise représente alors le niveau de confiance partagé sur cette question par les auteurs du rapport, fondé sur les observations, les résultats des modèles et les théories disponibles. Le tableau de correspondance suivant a été établi[1] :

Degré de confiance	Probabilité
Très élevé	95 % et plus
Elevé	67-95 %
Moyen	33-67 %
Faible	5-33 %
Très faible	5 % et moins

L'autre consiste en une appréciation qualitative des connaissances scientifiques sur lesquelles reposent les conclusions du rapport qui ne peuvent être évaluées quantitativement. Cette appréciation dépend de la quantité d'éléments en faveur d'une conclusion et du degré d'accord entre les experts sur l'interprétation de ces éléments. Quatre catégories ont ainsi été définies pour qualifier l'état des connaissances sur une question. Celui-ci peut être : bien établi ; établi mais incomplet ; spéculatif ; faire l'objet d'explications différentes dans le cas où les connaissances sont abondantes mais ne donnent pas lieu à une explication ou à une interprétation largement partagées.

Dans un premier temps, nous revenons sur les acquis du rapport sur les impacts. Nous décrivons en premier lieu les effets déjà observés. Précisons que la question d'imputer ou non les événements climatiques survenus durant les dernières décennies à un changement climatique d'origine anthropique est traitée dans le rapport du groupe 1. Puis, nous considérons les effets futurs, ce qui nous conduit à aborder la question suivante : quand les changements climatiques deviennent-ils dangereux ? Cette question, soulevée dans l'article 2 de la Convention cadre des Nations unies sur les changements climatiques, est reprise dans le rapport de différentes façons. En particulier, après avoir une dressé une typologie des impacts, le rapport étudie comment ceux-ci évoluent en fonction de l'élévation globale de la température durant ce siècle. Dans un deuxième temps, nous abordons les questions de méthodologie. Nous analysons les différents modes de traitement et de production de données et, par suite, de présentation des résultats. Nous étudions l'influence des choix méthodologiques sur les résultats fournis. L'un des principaux enjeux pour l'expertise sur les changements climatiques est en effet de délivrer aux politiques des informations lisibles sur des sujets de plus en plus complexes. Enfin, nous revenons sur les questions d'adaptation. Nous verrons qu'à cet égard le troisième rapport marque une progression nette par rapport au rapport précédent, en liant le développement durable à la capacité d'adaptation.

Les impacts des changements climatiques

Les effets constatés

Le rapport livre les conclusions globales suivantes pour les impacts observés sur les systèmes naturels et humains. Il précise également par quelles méthodes ces constats ont été dressés.

1. Lire aussi Michel Petit, *La description des incertitudes*, p. 34.

3e RAPPORT DU GIEC EXTRAIT

Source
GIEC, 2002, Résumé technique, p. 75.

Les observations indiquent que les changements climatiques au XXe siècle ont déjà touché un ensemble varié de systèmes physiques et biologiques. Des exemples de ces changements observés comprennent le retrait des glaciers, la fonte du pergélisol, la modification des dates de gel et de débâcle sur les cours d'eau et les lacs, les augmentations de la pluviosité et de l'intensité des pluies sous la plupart des moyennes et hautes latitudes de l'hémisphère Nord, la prolongation des saisons de croissance, et la précocité de la floraison des arbres, de l'apparition des insectes et de la ponte des oiseaux. Des liens statistiquement significatifs entre les modifications du climat régional et celles observées dans les systèmes physiques et biologiques ont été documentés en ce qui concerne les environnements terrestres, marins et d'eau douce sur tous les continents.

Pour parvenir à de telles conclusions, des méthodes ont été élaborées depuis le deuxième rapport du GIEC. De multiples facteurs non liés au climat et souvent interdépendants affectent simultanément les systèmes biotiques et abiotiques, ce qui rend difficile la détection de l'incidence des changements climatiques. Pour tenter de surmonter ce problème, des espèces (papillons, pingouins, grenouilles...) ont été utilisées afin de déceler les réactions aux changements climatiques et d'en déduire les répercussions plus globales sur les systèmes naturels (respectivement prairies naturelles, littoral antarctique, forêt tropicale d'altitude...). On repère alors les configurations de changement pour ces espèces, qui se répètent dans de nombreuses études et qui concordent avec les prévisions, selon l'évolution observée ou prévue du climat. L'imputation de ces modifications aux changements climatiques est davantage fondée lorsque les études sont reproduites dans des régions géographiques et des systèmes divers. Il existe des centaines d'études de ce type, mais certains systèmes et régions sont sous-représentés.

Plus de 2 500 articles ont été rassemblés ; ils portent sur le climat et les entités suivantes : animaux, végétaux, glaciers, glace de mer, glace de lac ou de cours d'eau. Afin de déterminer si ces entités ont subi l'influence des changements climatiques, seules les études qui répondaient à au moins deux des critères suivants ont été retenues :

– une caractéristique de l'entité (par exemple, limite de l'aire de répartition, date de fonte) a évolué au fil du temps ;

– il existe une corrélation entre cette caractéristique et les changements de température locale ;

– la température locale s'est modifiée au cours du temps.

En outre, deux de ces trois critères au moins devaient présenter une corrélation statistique significative. Seule la température a été considérée parce que son influence sur les entités examinées est connue et parce que ses tendances sont plus homogènes à l'échelle de la planète que d'autres facteurs climatiques qui varient localement, comme les précipitations. Les études retenues devaient s'étendre sur au moins dix ans — plus de 90 % d'entre elles s'étendaient sur plus de vingt ans.

Cette procédure a conduit aux résultats suivants.

3e RAPPORT DU GIEC EXTRAIT

Source
GIEC, 2002, Résumé technique, pp. 27-28.

Ces critères stricts ont ramené à 44 le nombre d'études sur les animaux et les végétaux, qui portaient sur plus de 600 espèces. Environ 90 pour cent de ces espèces (plus de 550) présentaient une évolution de leurs caractéristiques dans le temps. Sur ce nombre, 80 pour cent environ (plus de 450) ont changé dans le sens attendu, compte tenu des connaissances scientifiques sur les mécanismes qui lient la température à chacune des caractéristiques de ces espèces. La probabilité que plus de 450 espèces sur 550 présentent par hasard des changements conformes aux attentes est négligeable.

Les 16 études sur les glaciers, la glace de mer, l'étendue de la couverture neigeuse/la fonte des neiges, et la glace de lac ou de cours d'eau portaient sur plus de 150 emplacements. On a relevé, dans 67 pour cent des sites (plus de 100), des changements de caractéristiques au cours du temps. Sur ce nombre, environ 99 pour cent (plus de 99) ont évolué dans le sens attendu, compte tenu des connaissances scientifiques sur les mécanismes qui lient la température aux processus physiques qui régissent les changements de ces caractéristiques. La probabilité que 99 des 100 emplacements présentent par hasard des changements conformes aux attentes est négligeable.

Pour les évolutions liées aux précipitations, les conclusions du rapport sont plus contrastées. Ainsi, il est peu probable que les tendances perçues pour l'écoulement fluvial — augmentation et diminution de volume dans de nombreuses régions — résultent des changements climatiques, étant donné notamment la variabilité du comportement hydrologique dans le temps, la brièveté des relevés d'instruments et la réaction du débit fluvial à d'autres facteurs. Par contre, il est fort probable que les observations relatives à l'accélération généralisée du recul des glaciers et au déplacement des débits du printemps à l'hiver, dans de nombreuses régions, soient liées à la hausse des températures relevées. Le degré de confiance dans ces résultats est élevé parce que ces changements sont causés par l'élévation des températures et ne sont pas touchés par les facteurs qui influent sur les volumes d'écoulement. Le recul des glaciers se poursuivra et de nombreux petits glaciers disparaîtront (degré de confiance élevé). Le rythme dépendra de la vitesse du réchauffement.

Pour les écosystèmes terrestres et d'eau douce, de nombreuses études (observation et expérimentation) ont montré qu'il existe des liens entre les modifications du climat régional et celles des processus biologiques ou physiques au sein des écosystèmes : allongement de la période de croissance des végétaux de 1,2 à 3,6 jours par décennie sous les hautes latitudes de l'hémisphère Nord, réchauffement des lacs et des rivières causé par le raccourcissement de la durée de la couverture glaciaire, migration des végétaux alpins vers les sommets, augmentation de la mortalité et rétrécissement de l'aire de répartition des espèces dus au stress thermique, taille des populations, dimensions corporelles des spécimens et périodes de migration.

Dans certains cas, les tendances observées sont conformes aux prévisions, sans que des liens de cause à effet soient avancés. Parfois les effets attendus accentueront des effets déjà connus d'actions anthropiques locales.

3e RAPPORT DU GIEC EXTRAIT

De nombreuses zones côtières sont déjà confrontées à des niveaux élevés d'inondation, à l'accélération de l'érosion des côtes et à l'intrusion d'eau de mer dans les sources d'eau douce, processus qui seront accentués par les changements climatiques et par l'élévation du niveau de la mer. Ce dernier phénomène, en particulier, a contribué à l'érosion des barrages et des plages de sable et de gravier, à la disparition de dunes et de terres humides et aux problèmes d'évacuation des eaux dans de nombreuses zones côtières basses aux latitudes moyennes. Les écosystèmes très variés et productifs en bordure de mer, les établissements côtiers et les Etats insulaires continueront à subir des pressions dont les effets devraient être essentiellement néfastes, voire désastreux dans certains cas.

[…] Aux basses latitudes, le littoral tropical et subtropical est extrêmement sensible aux effets des changements climatiques, surtout dans les zones de forte pression démographique. Ces effets aggraveront de nombreux problèmes. Par exemple, les activités humaines ont accentué l'affaissement du sol dans beaucoup de régions deltaïques en augmentant les prélèvements d'eaux souterraines, en asséchant les terres humides et en réduisant ou éliminant la charge solide des cours d'eau. Les problèmes d'inondation, de salinisation des nappes d'eau potable et d'érosion côtière seront renforcés par l'élévation mondiale du niveau de la mer ajoutée à la submersion locale. Les zones les plus menacées sont les grands deltas d'Asie et les petites îles dont la vulnérabilité, établie il y a plus de dix ans, continue de croître.

Source
GIEC, 2002, Résumé technique, pp. 39 à 40.

Si l'on examine à présent les impacts sur la santé, on retrouve la difficulté déjà citée des origines multifactorielles des modifications observables : contextes locaux socio-économiques, démographiques et environnementaux, variant beaucoup dans le temps. Il en est de même des impacts sur les systèmes économiques et sociaux. Cependant, des indications préliminaires suggèrent que certains d'entre eux ont été touchés en partie par les changements climatiques régionaux qui se sont produits au XXe siècle. Il s'agit par exemple des dommages croissants causés par des inondations et des sécheresses en certains endroits, phé-

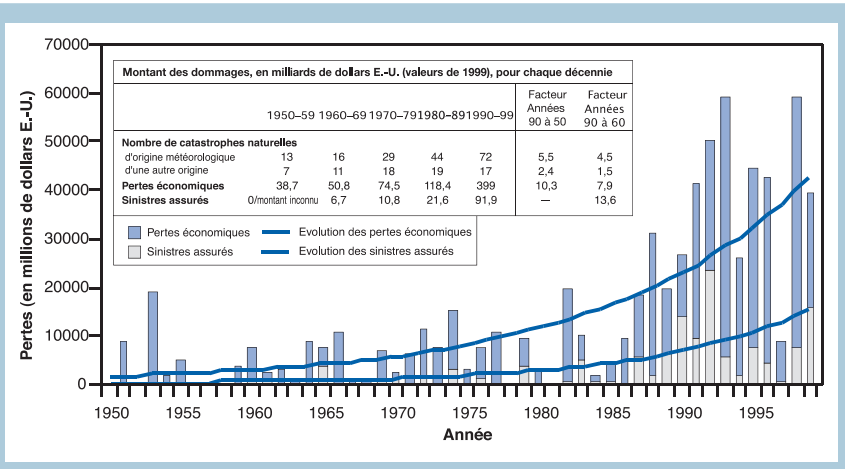
nomènes qui apparaissent nettement dans l'évolution du secteur de l'assurance.

Il est intéressant de s'attarder quelque peu sur ce secteur, concerné par les événements climatiques extrêmes. La figure 2.1 montre que durant les cinquante dernières années, le nombre de catastrophes naturelles d'origine météorologique dans le monde a crû considérablement (de 13 à 72), tandis que les pertes économiques associées étaient multipliées par dix. Le rapport entre les primes d'assurance des biens et des personnes et les pertes liées aux conditions météorologiques a aussi été divisé par trois entre 1985 et 1999.

3e RAPPORT DU GIEC EXTRAIT

FIGURE 2.1

Coût des catastrophes météorologiques



Montant des dommages, en milliards de dollars E.-U. (valeurs de 1999), pour chaque décennie

	1950–59	1960–69	1970–79	1980–89	1990–99	Facteur Années 90 à 50	Facteur Années 90 à 60
Nombre de catastrophes naturelles							
d'origine météorologique	13	16	29	44	72	5,5	4,5
d'une autre origine	7	11	18	19	17	2,4	1,5
Pertes économiques	38,7	50,8	74,5	118,4	399	10,3	7,9
Sinistres assurés	0/montant inconnu	6,7	10,8	21,6	91,9	—	13,6

Le coût des catastrophes météorologiques a grimpé en flèche ces dernières décennies. Les pertes économiques annuelles causées par les catastrophes majeures ont été multipliées par 10,3 en l'espace de 40 ans, passant de 4 milliards de dollars américains dans les années 50 à 40 milliards de dollars dans les années 90 (en dollars de 1999). La part assurée de ces pertes, négligeable au départ, est passée dans le même temps à 9,2 milliards de dollars annuels, tandis que le rapport entre les primes d'assurance et les pertes liées aux catastrophes a été divisé par trois. On notera que les coûts sont multipliés par deux si l'on prend aussi en compte les pertes découlant de conditions météorologiques ordinaires. Ces chiffres incluent généralement les sinistres subis par les personnes auto-assurées, à condition qu'elles soient officiellement déclarées comme telles (Munich Re, 2000).

Source
GIEC, 2002, Résumé technique, p. 46 (fig. 5).

Ces observations appellent plusieurs commentaires.

La hausse des pertes dues aux catastrophes naturelles a plusieurs origines. Elle est liée en partie à des facteurs socio-économiques, tels que la croissance démographique, l'augmentation des richesses et l'urbanisation dans des zones vulnérables, et en partie à des facteurs climatiques, comme l'évolution des précipitations, des inondations et des sécheresses. Une imputation précise est difficile et la part respective de ces deux causes varie selon les régions et le type d'événement. Toutefois, de nombreuses tendances observées concordent avec les conséquences attendues des changements climatiques. En outre, le taux de croissance des pertes provoquées par les hommes ou d'origine non météorologique a été bien plus faible que le taux de croissance des pertes liées aux événements d'origine météorologique.

La très faible présence voire l'absence de dispositifs d'assurance dans certains pays en développement rend ceux-ci encore plus vulnérables, renforçant d'autant l'iniquité face au risque climatique, comme le développe Pierre Picard. En effet, l'absence d'assurance limite fortement le développement, et par suite l'adaptation. Ainsi, des fonds destinés à des projets de développement intégrant des objectifs de réduction des émissions de gaz à effet de serre se retrouvent parfois affectés à des opérations de remise en état. Ce handicap devrait s'accentuer en cas d'augmentation de la fréquence des événements climatiques extrêmes.

LIRE PAGE 62 ▸

Dans les pays développés, les pertes associées aux conditions météorologiques extrêmes peuvent exercer des pressions sur les compagnies d'assurance au point de réduire leur rentabilité, de majorer les tarifs, de supprimer certaines couvertures et de faire plus souvent appel à une aide de l'Etat. L'augmentation de l'incertitude aggravera la vulnérabilité du secteur des assurances et surtout de la réassurance et compliquera les mesures d'adaptation et de secours pour faire face aux changements climatiques. Ces secteurs devront donc rechercher des solutions innovantes pour couvrir les risques climatiques. Des mutations sont déjà à l'œuvre, comme en témoigne l'apparition de nouveaux outils financiers.

Les impacts futurs

Le rapport s'étend beaucoup plus sur les effets futurs des changements climatiques. Il traite des impacts, de l'adaptation et de la vulnérabilité aux changements climatiques en consacrant un chapitre aux thèmes suivants : hydrologie et ressources en eaux ; écosystèmes et biens et services associés : zones côtières et écosystèmes marins ; établissements humains, énergie et industrie ; assurance et autres services financiers ; santé humaine. Il procède également à une analyse par région du monde et consacre un chapitre à chacune d'entre elles : Afrique, Asie, Australie et Nouvelle-Zélande, Europe, Amérique latine, Amérique du Nord, régions polaires (Arctique et Antarctique) et petits Etats insulaires.

Sans vouloir exposer ici l'ensemble des résultats du rapport, nous mentionnerons certaines conclusions concernant les écosystèmes, les ressources en eau et la santé humaine. Les vulnérabilités de l'Afrique au changement climatique et des pistes d'adaptation dans cette région sont développées par Marc Bied-Charreton. L'état des modèles de prévision des impacts des changements climatiques en France est présenté par Michel Déqué.

LIRE PAGE 64 ▸

LIRE PAGE 67 ▸

Pour ce qui concerne les écosystèmes, les populations de nombreuses espèces, déjà menacées, seront exposées à des risques accrus du fait de la synergie entre le stress causé par le changement climatique, qui rend inadaptés certains habitats actuels, et les changements d'affectation des terres, qui morcellent les habitats. L'incidence serait marquée sur les populations les plus pauvres, qui tirent leur subsistance de la nature. La disparition ou la diminution des espèces aurait des répercussions sur leur rôle dans les écosystèmes (pollinisation, effet antiparasitaire naturel, etc.), dans les loisirs, ainsi que dans les pratiques culturelles et religieuses des populations autochtones. L'adaptation, par l'aménagement de réserves et de parcs comportant des couloirs de migration, par l'élevage en captivité ou le transfert de certaines espèces, pourrait être limitée en raison de son coût.

Pour l'hydrologie et les ressources en eau, il est probable que l'ampleur et la fréquence des inondations augmentent dans la plupart des régions et que les basses eaux diminuent dans de nombreuses régions. De façon générale, on prévoit un renforcement de l'évaporation, ce qui pourrait réduire les basses eaux, même là où les précipitations augmentent ou changent peu. Environ 1,7 milliard de personnes, soit un tiers de la population mondiale, vivent actuellement dans des pays qui souffrent de stress hydrique (utilisant plus de 20 % de leurs ressources en eau renouvelable). Ce chiffre pourrait passer à 5 milliards. Les changements climatiques pourraient réduire encore l'écoulement et la recharge des nappes dans nombre de ces pays (Asie centrale, Afrique australe, pourtour méditerranéen) et les accroître dans d'autres. Ils mettent à l'épreuve les pratiques actuelles de gestion des ressources en eau. Intégrer l'incertitude dans la gestion et la planification de ces ressources est un pari important mais difficile. Afin de concilier des utili-

sations et des demandes différentes et changeantes, une gestion globale apparaît nécessaire. Mieux prévoir les caractéristiques d'écoulement des semaines, voire des mois à l'avance permettrait de faire face aux nouveaux modes de variabilité hydrologique. Par ailleurs, les capacités d'adaptation sont très inégalement réparties dans le monde et dépendent en particulier de l'existence d'institutions responsables de la gestion de l'eau. Le défi consiste donc à trouver des façons d'introduire la gestion intégrée dans des contextes institutionnels particuliers, démarche nécessaire même en l'absence de changements climatiques.

Pour la santé humaine, il ressort des conclusions de la plupart des études fondées sur des modèles de prévision, que, selon les scénarios du changement climatique :

– le nombre de personnes exposées aux maladies à transmission vectorielle (paludisme, dengue, qui peuvent toucher 40 à 50 % de la population mondiale) augmenterait par suite de la croissance de l'aire de transmission de ces maladies (degré de confiance moyen à élevé) ;
– les vagues de chaleur augmenteront et seront souvent amplifiées par l'humidité accrue et la pollution atmosphérique urbaine, se traduisant par une progression des décès touchant tout particulièrement les populations urbaines et parmi elles les personnes malades ou âgées (degré de confiance élevé) ;
– l'augmentation des inondations multiplie les risques de noyade, de maladies diarrhéiques et respiratoires et, dans les pays en développement, de faim et de malnutrition (degré de confiance élevé). L'intensification de l'activité cyclonique aurait aussi des effets dévastateurs. Dans certaines régions notamment tropicales, la réduction du rendement des cultures et de la production alimentaire augmentera les risques de malnutrition.

Pour l'agriculture, les évaluations fondées sur la modélisation des cultures (degré de confiance moyen à faible) conduisent aux résultats suivants : si l'on tient compte de l'adaptation agronomique autonome, l'évolution du climat sur le rendement des cultures aura, dans la majorité des cas, des effets positifs sous les latitudes moyennes si le réchauffement est inférieur à quelques degrés Celsius (traduction de *a few* °C, expression employée dans le résumé à l'intention des décideurs), et en général négatifs dans le cas d'un réchauffement supérieur. Dans la plupart des régions tropicales et subtropicales, des évaluations analogues indiquent que le rendement des cultures serait inférieur aux niveaux estimés dans les conditions climatiques actuelles.

Des motifs de préoccupation

L'objectif de la Convention cadre des Nations unies sur les changements climatiques est exposé dans son article 2 : « L'objectif ultime de la présente Convention [...] est 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. Il conviendra 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 économique puisse se poursuivre de manière durable ».

Le rapport consacre son premier et son dernier chapitre à fournir les informations disponibles pour permettre à chacun de juger à partir de quand il considère qu'une perturbation anthropique du système climatique peut être dangereuse. Le danger est fonction à la fois du degré à partir duquel les effets des changements climatiques sont considérés comme négatifs et de celui où ceux-ci sont vécus comme inacceptables. La deuxième estimation est un jugement de valeur et ne relève donc pas du mandat du GIEC.

Le dernier chapitre s'éloigne des analyses sectorielles et régionales effectuées précédemment. Il étudie l'influence d'un indicateur du changement climatique — la température moyenne globale — sur les impacts, en classant ceux-ci en cinq motifs de préoccupation de nature très différente. Chacun d'entre eux peut être utilisé séparément ou avec d'autres pour examiner différents aspects de la vulnérabilité aux changements climatiques. Le rapport n'indique pas comment utiliser certaines ou toutes les raisons de préoccupation étudiées pour déterminer ce qu'est un niveau dangereux pour le changement climatique.

Ces cinq raisons s'expriment comme la relation entre l'élévation de la température moyenne globale et :

– les dommages ou les pertes irréversibles causés aux systèmes uniques et menacés ;
– la distribution des impacts (géographique, entre les populations ou les secteurs) ;
– les impacts agrégés à l'échelle globale ;
– la probabilité d'événements climatiques extrêmes ;
– la probabilité d'événements singuliers à grande échelle ou majeurs.

La présentation des résultats selon cette grille est précédée d'un avertissement sur les capacités à dresser un tableau satisfaisant pour les relations recherchées. En effet, en dépit des nombreuses études sur les impacts, il subsiste une forte incertitude sur l'effet potentiel de l'adaptation pour diminuer les effets négatifs et exploiter les effets positifs des changements climatiques. De plus, dans la plupart des études d'impact, les effets de la modification des conditions de référence, comme la croissance économique et le développement de nouvelles technologies, n'ont pas été pris en compte de façon adéquate. Enfin, la plupart des études évaluent les effets d'un climat stabilisé, et non ceux de différents rythmes d'évolution du climat.

Moyennant ces précisions, le rapport livre les conclusions suivantes, en se référant à trois gammes différentes pour le réchauffement moyen global : « faible », si celui-ci est inférieur à 2 °C ; « moyen », s'il est compris entre 2 et 3 °C ; « élevé », au-delà.

Les systèmes uniques et menacés

Les glaciers tropicaux, les récifs coralliens, les atolls, les mangroves, les lieux concentrant une très riche biodiversité ou *hot spots* sont des exemples d'entités menacées confinées dans de petites zones géographiques et très sensibles aux changements climatiques. Cependant, leur dégradation ou disparition pourrait avoir des conséquences bien au-delà de ces zones. Pour des scénarios de réchauffement faible à l'horizon 2100, les espèces et systèmes naturels et humains déjà très vulnérables seraient affectés négativement. D'autres pourraient connaître des effets positifs (*cf.* les impacts sur l'agriculture, page précédente). Plus le climat se réchauffe, plus le nombre de systèmes endommagés augmente, à mesure que les seuils critiques des systèmes sont dépassés. La menace provient également des effets indirects des changements climatiques, comme le changement de l'utilisation des terres.

La distribution des impacts

Les impacts des changements climatiques ne seront pas uniformément distribués entre les différentes populations de par le monde. Les pays en développement se montreront plus vulnérables que les pays développés (degré de confiance élevé) et les inégalités de revenus devraient s'exacerber non seulement entre les pays, mais aussi au sein des pays (degré de confiance moyen). Pour un faible réchauffement, on pourrait s'attendre à un résultat net négatif sur les secteurs marchands des pays en développement et positif dans les pays développés (degré de confiance moyen). Pour un réchauffement moyen à élevé, on obser-

vera une diminution et éventuellement une inversion du signe des impacts préalablement positifs, ainsi qu'une accentuation des impacts négatifs (degré de confiance élevé). Les incertitudes sur les effets distributifs proviennent des méthodes d'agrégation et de comparaison (lire pp. 51 et suivantes), et des hypothèses sur la variabilité du climat, l'adaptation, les niveaux de développement, entre autres. En outre, les impacts pourront varier d'un pays à l'autre et dans un même pays. De ce fait, les bénéfices ou les dommages ne seront pas les mêmes au sein des pays en développement ou des pays développés.

Les impacts agrégés à l'échelle globale

Les mêmes réserves méthodologiques s'appliquent pour l'évaluation des impacts dès lors que ceux-ci sont agrégés à une échelle régionale, voire globale. En effet, les fortes disparités infrarégionales, de nature culturelle, sociale et économique, sont alors ignorées (lire pp. 51 et suivantes).

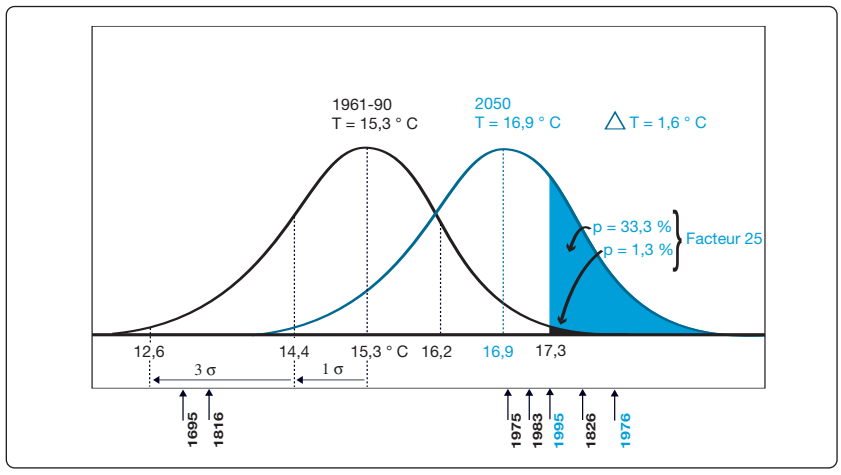
Les événements extrêmes

La fréquence et/ou l'ampleur de nombreux événements climatiques extrêmes augmentent même pour une faible hausse de la température et ce phénomène s'intensifiera pour des réchauffements plus forts (degré de confiance élevé). Ces événements comprennent notamment les inondations, les sécheresses, les anomalies de température et les incendies. Leur impact peut être très important localement voire régionalement. Sur le plan statistique, une faible augmentation de la moyenne d'une variable comme la température suffit pour que la probabilité très faible de franchir un seuil se trouve multipliée par un facteur significatif. Ces seuils peuvent être liés par exemple à une protection naturelle ou artificielle ou encore à la présence d'habitations dans la zone considérée.

Ce point est illustré par la figure 2.2 dans le cas d'une augmentation de la température moyenne estivale au centre de l'Angleterre. Une hausse relativement faible de la température moyenne accroît dans des proportions très importantes la probabilité que la température atteigne des valeurs extrêmes. La figure montre qu'un réchauffement de 1,6 °C correspondant aux résultats de scénarios de changement climatique sur cette région multiplie par 25 la probabilité que la température dépasse la température enregistrée en 1995 et considérée comme une valeur extrême, 17,3 °C. Ainsi, un événement auquel était associé un temps de retour de soixante-quinze ans se produirait désormais en moyenne tous les trois ans. En parallèle, vagues de chaleur et sécheresses seraient plus fréquentes et intenses.

FIGURE 2.2

Effet de l'augmentation de la température moyenne estivale en Angleterre



Source : Climate Change Impacts UK 1996.

Les événements singuliers majeurs

Des discontinuités à grande échelle provoquées par des forçages externes complexes du système climatique, comme l'arrêt de la circulation thermohaline de l'Atlantique Nord ou la dislocation des glaciers continentaux de l'Antarctique ouest, se sont déjà produites par le passé. Dans le futur, des événements de ce type, auxquels il faut ajouter des perturbations majeures de la dynamique du carbone régulée par la biosphère, pourraient avoir des impacts très importants sur les systèmes naturels et socio-économiques, impacts qui n'ont pas été suffisamment étudiés. Il est difficile de déterminer quand des singularités majeures pourraient se produire et avec quelle probabilité car celles-ci sont provoquées par des interactions complexes entre les composantes du système climatique. En outre, les effets de ces singularités pourraient apparaître plusieurs décennies voire plusieurs siècles après leur déclenchement. Pour progresser, les travaux dans ce domaine devront s'inscrire dans des horizons s'étendant bien au-delà de 2100 (lire à ce sujet le chapitre 1, pp. 22 à 24).

Les relations entre la hausse de la température moyenne globale et les cinq sujets de préoccupations pour les impacts sont représentées de façon condensée sur la figure 2.3. Celle-ci délivre des informations davantage qualitatives que quantitatives, ce qui est justifié par les incertitudes mentionnées plus haut.

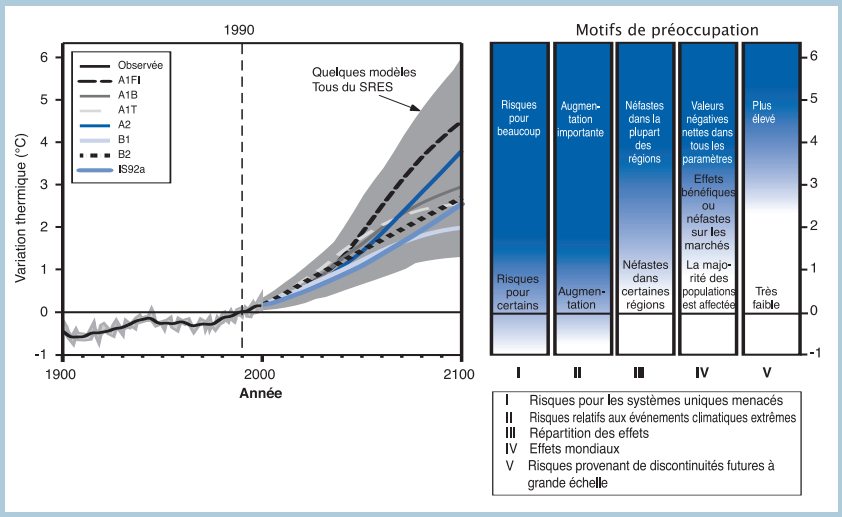
Si le rapport ne se prononce pas sur l'existence d'un seuil pour l'élévation de la température moyenne globale, seuil au-delà duquel les perturbations anthropiques du système climatique deviennent dangereuses, un débat soutenu a toutefois eu lieu au sein du GIEC sur ce point, comme en témoigne Jean-Pascal van Ypersele.

LIRE PAGE 70 ▸

3e RAPPORT DU GIEC EXTRAIT

FIGURE 2.3

Sujets de préoccupation quant aux impacts projetés des changements climatiques



Les risques d'effets nocifs des changements climatiques s'accroissent avec leur ampleur. La partie gauche de la figure montre les élévations de température observées par rapport à 1990 et la fourchette des estimations projetées après 1990 selon les estimations du groupe 1 du GIEC pour les scénarios du Rapport spécial sur les scénarios d'émissions. La partie droite représente les cinq motifs de préoccupation concernant l'évolution des risques liés au changement climatique jusqu'en 2100. Les impacts ou les risques neutres, faiblement négatifs ou positifs sont indiqués en blanc, les impacts négatifs pour quelques systèmes ou les risques faibles sont indiqués en bleu clair, et les impacts négatifs ou les risques plus répandus et/ou de plus grande ampleur sont indiqués en bleu foncé. L'évaluation des impacts ou des risques tient compte uniquement de l'ampleur du changement et pas de son rythme. Dans cette figure la variation annuelle moyenne de la température globale est utilisée comme indicateur de l'ampleur du changement climatique mais les impacts projetés seront fonction, entre autres facteurs, de l'ampleur et du rythme des changements globaux et régionaux du climat moyen, de la variabilité du climat et des phénomènes climatiques extrêmes, des conditions sociales et économiques et de l'adaptation.

Source
GIEC, 2002, Résumé à l'intention des décideurs, p. 6 (fig. 2).

L'évaluation des dommages et les implications pour la décision

L'identification des effets des changements climatiques et de leurs implications sur la biosphère et les activités humaines joue naturellement un rôle central dans la détermination des politiques à mettre en œuvre pour lutter contre l'aggravation de l'effet de serre. Il s'agit bien de « ne pas laisser la perception des risques [climatiques] dans le domaine virtuel. Cela suppose de ne pas se limiter aux événements météorologiques extrêmes et aux catastrophes climatiques mais de suivre aussi les évolutions continues [...], de régionaliser la représentation des impacts, de travailler sur la vulnérabilité de nos organisations sociales et économiques au climat (en identifiant par exemple les seuils critiques) » (Dron D., 2003).

Le travail du groupe 2 est précisément dédié à l'identification des impacts spécifiques des changements climatiques, seule susceptible de mobiliser une action d'ampleur pour prévenir ces impacts, ou éventuellement les anticiper pour mieux s'y adapter. Un autre enjeu scientifique et politique est l'estimation des effets de ces changements sur les activités humaines, y compris sur la production future de richesses. C'est dans ce sens aussi que la lutte contre les changements climatiques s'insère dans une logique de développement durable : préserver l'environnement pour maintenir le potentiel de développement global.

Des impacts aux dommages

Le groupe 2 du GIEC s'est attaché d'une part à mettre en évidence que les changements climatiques en cours ont d'ores et déjà eu des impacts observables et d'autre part à envisager ces impacts dans le cadre de scénarios de réchauffement global au cours du XXIe siècle. De là, il

était naturel d'évaluer les effets socio-économiques de ces impacts, c'est-à-dire de revenir aux activités humaines. Le défi méthodologique que représente cette tâche est considérable. En effet, l'analyse des « dommages » cumule les incertitudes : futurs niveaux d'émission des gaz à effet de serre, science du climat, modélisation à une échelle régionale fine, problèmes méthodologiques de l'évaluation du coût des atteintes à l'environnement sur le long terme. Ces tentatives d'évaluation économique sont aussi motivées par l'application possible de la méthode coût-bénéfice comme guide à la décision en matière de changement climatique (lire chapitre 3, page 77). Il s'agirait de mettre en regard les bénéfices de la lutte contre les changements climatiques et les coûts engagés dans la poursuite de cet objectif. Très tôt, certains économistes se sont attaqués à ce chantier, en dépit d'obstacles méthodologiques et politiques majeurs.

Parmi d'autres sujets, la valorisation de la vie humaine a fait l'objet de violents débats lors de la rédaction du deuxième rapport d'évaluation du GIEC : si l'on compare les primes d'assurance-vie d'un habitant d'un pays en développement à celles d'un Européen ou d'un Nord-Américain, on parvient à la conclusion que la vie du premier vaudrait bien moins que celle du second. Dans tous les cas, choisir entre réduction des émissions et dommages des changements climatiques est beaucoup plus qu'un simple choix économique...

Qu'entend-on exactement par « dommage » ? Les changements climatiques vont entraîner des modifications directes de l'environnement : c'est le changement d'état *a priori*, positif ou négatif, que l'on nomme « impact des changements climatiques ». Le système ainsi déstabilisé va faire jouer tout un ensemble de couplages et de rétroactions. Ces dernières peuvent être une modification de la distribution des espèces, une variation des productions et des revenus, un changement des comportements (c'est-à-dire une adaptation). Le système va donc être modifié à la fois par la perturbation exogène et par ses propres rétroactions internes endogènes, pour aboutir à un nouvel état *a posteriori*. C'est l'éventuelle perte de bien-être associée à ce nouvel état que l'on appelle dommage. Alors que les impacts sont mesurables par des variables physiques (rendements agricoles, surface de forêt, érosion des côtes, espèces menacées...), les dommages représentent une différence de bien-être. Dans certains cas, celle-ci peut être monétarisée ou exprimée sous la forme d'un indice composite comme la valeur de la production d'une activité donnée, sa valeur ajoutée, ou encore le revenu disponible des ménages d'une région. Dans d'autres cas, comme le souligne le GIEC, la monétarisation est impossible. C'est le cas, par exemple, pour la disparition de lieux à forte valeur symbolique situés sur des territoires très vulnérables.

3e RAPPORT DU GIEC EXTRAIT

A first difficulty is synthesis—-the need to reduce the complex pattern of individual impacts to a more tractable set of regional or sectoral indicators. The challenge is to identify a set of indicators that can summarize and make comparable the impacts in different regions, sectors, or systems in a meaningful way. A range of indicators and methods have been put forward. Many models use physical measures such as the number of people affected [...], change in net primary productivity [...], or the number of systems undergoing change [...].

The most widespread numeraire, however, is economic cost. This numeraire is particularly well-suited to measure market impacts—-that is, impacts that are linked to market transactions and directly affect GDP (i.e., a country's national accounts). The costs of sea-level rise, for example, can be expressed as the capital cost of protection plus the economic value of land and structures at loss or at risk; agricultural impacts can be expressed as costs or benefits to producers and consumers, including the incremental costs of adaptation. Using a monetary numeraire to express non-market impacts such as effects on ecosystems or human health is more difficult. It is possible in principle, however. There is a broad and established literature on valuation theory and its application, including studies (mostly in a non-climate change context) on the monetary value of lower mortality risk, ecosystems, quality of life, and so forth. However, economic valuation can be controversial and requires sophisticated analysis, which still is mostly lacking in a climate change context.

Source
IPCC, 2001, p. 936 (chapitre 19.4.1).

Illustrons brièvement comment l'on passe des impacts des changements climatiques aux dommages associés et la complexité de ce passage.

La dégradation du capital naturel

Une certaine qualité de l'environnement est nécessaire aux activités productives comme l'agriculture, la sylviculture, la pêche et l'élevage ; elle peut être à l'origine d'un flux de revenus (les activités touristiques) et, sans médiation financière, assurer des services (disponibilité de l'eau, faculté d'épuration de certains milieux, ressources de la mer dans les cultures traditionnelles). La dégradation du capital naturel causée par les changements climatiques pourrait donc se traduire par la baisse de la productivité de secteurs vulnérables.

L'accélération de l'obsolescence du capital productif et les menaces sur l'habitat

En dessinant une nouvelle carte de l'exposition aux risques naturels comme les tempêtes, les inondations, les glissements de terrain, le changement climatique pourrait détériorer le capital productif, les infrastructures et les habitations aujourd'hui peu vulnérables.

Un ralentissement de la croissance et une menace pour le développement

Le ralentissement de la croissance par rapport à un sentier de croissance de référence est en partie une conséquence des deux points précédents. Il est d'autant plus probable que le changement climatique est prononcé dans les scénarios. Une partie de l'investissement et de la consommation de référence serait affectée à des travaux de réparation et de protection, d'où une baisse du bien-être futur par rapport à cette référence et une menace supplémentaire pour le développement. Par ailleurs, les dommages pourraient affecter la productivité générale et entraîner une baisse instantanée du revenu.

Bien-être et environnement

En touchant les activités productives et en détournant certaines ressources vers la restauration de l'environnement dégradé par le climat, les changements climatiques affectent directement la croissance et donc le niveau de vie. Mais ce n'est qu'un des éléments constituant le bien-être. La contribution de l'environnement au bien-être dépend en outre des activités productives, de la qualité et de l'abondance des satisfactions retirées des services offerts par l'environnement, donc du niveau et de la qualité de vie, de la conscience que nous avons du rôle joué par l'environnement comme support de la vie sur terre, etc.

La préférence pour la stabilité du bien « environnement » peut avoir deux significations : la première reflète le contenu subjectif de la valeur qui lui est attribuée, la seconde une attitude de précaution. Dans la première catégorie sont regroupées des préoccupations hédonistes (satisfaction que procure la pratique de loisirs dans une « belle » nature, désir d'habiter dans une zone à haute qualité de vie) ou un ensemble de considérations regroupées dans la valeur d'existence (droit à la vie des animaux, altruisme à l'égard des potentiels « réfugiés du changement climatique », valeur de legs des paysages auxquels nous sommes attachés). La seconde catégorie cherche à représenter l'aversion au risque que représenterait une rupture de l'environnement[2]. Si nous n'avons pas forcément conscience du rôle central de l'environnement, nous attachons néanmoins une certaine valeur à sa préservation qui reflète notre degré d'information et notre sentiment plus ou moins conscient du risque d'une rupture du milieu naturel dans lequel nous vivons.

Au-delà des considérations qui précèdent, il faudrait en toute rigueur prendre en compte toutes les interactions et rétroactions internes au système considéré et éviter de conclure à partir d'études de dommages limitées à un secteur ou à une région, comme le montrent Jean-Charles Hourcade et Philippe Ambrosi.

LIRE PAGE 73 ▸

2. *Cf.* par exemple le sondage conduit par Nordhaus (Nordhaus W., 1994) sur les dommages marchands et non marchands des changements climatiques et les enjeux distributifs associés, auprès de dix-neuf scientifiques d'horizons disciplinaires variés (sciences naturelles, économie, technologie, sciences sociales). Il ressort de l'analyse des résultats (Nordhaus, 1994 ; Roughgarden et Schneider, 1999) que les estimations fournies par les chercheurs en sciences naturelles sont vingt à trente fois plus importantes que celles données par les économistes, hors économie de l'environnement.

Les défis méthodologiques

Les impacts économiques de l'accroissement de l'effet de serre sont une des informations dont les décideurs souhaiteraient disposer pour choisir les mesures de réduction des émissions, ou encore pour élaborer des stratégies d'adaptation au changement climatique. Passer des impacts aux dommages n'est pas chose aisée, nous l'avons vu. Les évaluations monétaires existantes, aussi prudentes soient-elles, sont entachées de biais méthodologiques qui tendent à sous-estimer les dommages. Ceci est dû au fait qu'il s'agit d'une question scientifique relativement jeune et que, par conséquent, les méthodes existantes ne sont pas nécessairement adaptées pour traiter d'une atteinte à l'environnement d'une telle ampleur.

Nous illustrons dans ce qui suit certains des problèmes méthodologiques rencontrés dans l'évaluation des dommages, non pas pour jeter un discrédit sur les évaluations existantes, mais pour comprendre ce qu'elles peuvent éventuellement masquer, pour des raisons plus techniques, voire pratiques, qu'idéologiques.

Adopter une métrique commune ?

Le premier problème que l'on rencontre dans l'évaluation des conséquences intégrées est celui de la métrique commune, qui est nécessaire pour comparer des dommages dans différents secteurs ou différentes régions. Le GIEC reconnaît clairement, on l'a vu, les limites des évaluations économiques actuelles sur ce point (IPCC, 2001, p. 936, chapitre 19.4.1).

La régionalisation des impacts et des dommages

Se pose ensuite le problème de la régionalisation des changements climatiques et de ses impacts. Les différents modèles régionaux ne donnent pas encore de résultats cohérents, en particulier sur le cycle hydrologique, ce à quoi il faut ajouter les incertitudes issues des études d'impact.

3e RAPPORT DU GIEC EXTRAIT

Distributional analysis depends heavily on the geographical details of climate change, but these details are one of the major uncertainties in the outputs of climate change models. This is particularly true for estimates of precipitation; for example, estimates of water-sector impact can vary widely depending on the choice of GCM [General Circulation Model]. Uncertainties continue at the level of impact analysis. Despite a growing number of country-level case studies, our knowledge of local impacts is still too uneven and incomplete for a careful, detailed comparison across regions. Furthermore, differences in assumptions often make it difficult to compare case studies across countries. Only a few studies try to provide a coherent global picture on the basis of a uniform set of assumptions. The basis of most such global impact assessments tends to be studies undertaken in developed countries—often the United States—which are then extrapolated to other regions. Such extrapolation is difficult and will be successful only if regional circumstances are carefully taken into account, including differences in geography, level of development, value systems, and adaptive capacity. Not all analyses are equally careful in undertaking this task.

Source
IPCC, 2001, p. 937 (chapitre 19.4.1.).

De plus, le passage des impacts climatiques aux dommages se heurte à la difficulté suivante : les régions homogènes du point de vue du changement climatique et les régions auxquelles se rapportent les données économiques existantes (le plus souvent un pays) ne se recouvrent pas en général. En l'absence d'informations économiques à une échelle suffisamment fine, nombre d'études utilisent les résultats d'analyses obtenus sur d'autres régions pour lesquelles existent des données statistiques et économiques, en particulier l'Amérique du Nord. A l'évidence, la fiabilité des résultats s'en ressent. Malheureusement, les pays potentiellement les plus vulnérables ne disposent guère

des moyens nécessaires pour mener de telles études, qui dépendent donc de collaborations internationales.

L'agrégation des dommages

Une fois les études régionales menées se pose le problème de l'agrégation des résultats, indispensable pour procéder à une évaluation globale des changements climatiques. Ceci renvoie à une autre question méthodologique : le traitement de l'équité et plus précisément de l'équité intragénérationnelle. L'agrégation des résultats d'une ou plusieurs régions et activités suppose de comparer le bien-être d'individus appartenant à des groupes culturels et sociaux différents, et donc de s'accorder sur un indicateur de bien-être commun à tous. Cependant, les différences de culture et d'organisation sociale rendent cet indicateur difficile à déterminer. En réalité, seule la prise en compte de l'hétérogénéité des populations peut permettre d'évaluer de façon correcte les conséquences des changements climatiques. En effet, celles-ci peuvent provoquer des disparités extrêmement prononcées et modifier qualitativement les résultats des études précédentes, fondées uniquement sur les critères des pays développés.

Nécessitant des jugements de valeur non scientifiquement fondés par essence, l'agrégation des dommages ne peut être effectuée uniquement par des chercheurs et exige une collaboration étroite avec les politiques.

3e RAPPORT DU GIEC EXTRAIT

Source
IPCC, 2001, p. 941 (chapitre 19.5.1).

Aggregating impacts requires an understanding of (or assumptions about) the relative importance of impacts in different sectors, in different regions, and at different times. Developing this understanding implicitly involves value judgments. The task is simplified if impacts can be expressed in a common metric, but even then aggregation is not possible without value judgments [...] Aggregate impact estimates can be very sensitive to the aggregation method and the choice of numeraire. All of these factors make aggregate analysis difficult to carry out and reduce our overall confidence in aggregate results. Nevertheless, aggregate studies provide important and policy-relevant information.

Si l'agrégation des dommages entre régions conduit à un dommage total relativement modeste — quoique entaché de très fortes incertitudes, ce que souligne le GIEC à maintes reprises —, c'est aussi parce que les méthodes employées font l'hypothèse d'un schéma de compensation entre régions. Ainsi, à partir des résultats de Mendelsohn *et al.* (1997) dans le cas d'un réchauffement de 2 °C à l'horizon 2060, les pays membres de l'OCDE sont légèrement bénéficiaires (gain de 69 milliards de dollars, soit 0,1 % du produit intérieur brut, PIB, de cette région), tandis que les autres pays sont très vulnérables (perte de 348 milliards de dollars, soit - 0,8 % du PIB régional). Le résultat net mondial, légèrement négatif (- 0,3 % du revenu mondial), suppose de fait d'importants transferts financiers de compensation entre gagnants et perdants, de l'ordre de 69 milliards de dollars. Or, la faisabilité de ces transferts, d'un total comparable au montant actuel de l'aide publique au développement des pays membres du Comité d'aide au développement de l'OCDE, est loin d'être assurée. Quand bien même de tels transferts seraient envisageables, il n'en reste pas moins que la compensation *ex post* des populations vulnérables n'est pas forcément possible. En effet, ces populations pourront avoir subi des transformations irréversibles de leur environnement remettant en cause leur mode de vie et les contraignant à migrer.

L'agrégation des dommages sous forme de pourcentage du PIB peut masquer des effets catastrophiques dans certains pays à faible PIB (Ambrosi P., J.-C. Hourcade & H. Le Treut, 2002). Ainsi, en agrégeant les résultats de l'évaluation de Mendelsohn *et al.* (1997), on obtient un

résultat modeste (une perte de 0,3 % du PIB mondial) qui atténue considérablement l'image d'un monde où les dommages des changements climatiques sont très inégalement répartis. Par exemple, les impacts monétarisés pour le secteur agricole constituent une perte de 132 milliards de dollars en Afrique et de 220 milliards de dollars en Asie, soit respectivement environ 4,7 % et 0,7 % du PIB régional. L'agrégation de ces deux régions conduit à des pertes pour le secteur agricole de l'ordre de 352 milliards de dollars, soit un peu plus de 1 % du PIB agrégé. Cette statistique ne rend plus compte du très lourd fardeau supporté par l'Afrique où les conséquences socio-économiques des changements climatiques ont de grandes chances d'être beaucoup plus prononcées que ne laisse supposer une modeste perte exprimée en terme de PIB agrégé, ainsi qu'en témoigne l'exemple de l'Ouganda cité plus bas.

De plus, ces études ne prennent en compte ni les rétroactions macroéconomiques ni la propagation possible des impacts mentionnées par Jean-Charles Hourcade et Philippe Ambrosi. Or, l'existence de propagations régionales significatives est possible : il est difficile d'imaginer que des impacts dramatiques dans certains pays n'aient aucune conséquence sur d'autres pays peu touchés directement par les changements climatiques. Les précédentes crises économiques (asiatique en 1998, argentine en 2001) ayant montré la vulnérabilité des économies aux phénomènes de contagion, il semble essentiel de prendre ces phénomènes en compte dans le cas du changement climatique. En outre, à l'intérieur d'un même pays, des mécanismes de propagation sectorielle ainsi que de fortes hétérogénéités peuvent modifier dramatiquement le résultat des études d'impacts.

Le cas de l'Ouganda en fournit un exemple frappant et montre bien les limites des études réalisées jusqu'ici. Pour une élévation de la température moyenne de 2 °C, la surface disponible pour la culture du café en Ouganda serait considérablement réduite (Simonett O., 1989). L'agriculture, qui fait vivre 90 % des 22 millions d'habitants et génère 80 % des emplois, représente la principale ressource du pays, soit près de 45 % du PIB et 90 % des exportations. La culture du café est majoritairement destinée à l'exportation et assurait jusqu'en 1999 près de 65 % des revenus du pays en devises étrangères (World Bank, 2001 ; FAO, 2002). Si la superficie destinée à la culture du café était dramatiquement réduite par le changement climatique, le dommage résultant ne se mesurerait pas seulement en termes de perte de productivité multipliée par la part de PIB pour cette activité. Il faudrait également prendre en compte, à l'échelle nationale, les conséquences macroéconomiques (déséquilibre de la balance des échanges, diminution du revenu d'une partie de la population), sociales (chômage, déplacement de populations vers la périphérie des zones urbaines) et éventuellement leurs répercussions régionales (flux de migrants vers les pays voisins), ainsi que les effets sur le marché international du café.

Un autre exemple concerne les ressources en eau. Les sécheresses risquent de s'accentuer au Maghreb comme au Sahel à l'horizon 2050 (c'est-à-dire au nord et au sud du Sahara). Par ailleurs, les seuils de consommation d'eau risquent de descendre en dessous de 500 m^3 par habitant et par an (soit le seuil de pénurie) dans cinq Etats du sud et de l'est de la Méditerranée, en 2025, et dans huit, en 2050 (Deneux M., 2002). Ces données sont à mettre en perspective avec les faits suivants : à l'heure actuelle, les interdépendances entre Etats pour l'accès à l'eau sont très fortes au sud et à l'est de la région et sont, ou ont été, à l'origine de conflits. Ces pays connaissent une explosion démographique qui se traduit par une croissance des villes sans précédent. Celle-ci génère des conflits pour l'usage de l'eau entre centres urbains (qui détournent l'eau destinée aux cultures irriguées) et activités agricoles,

ainsi qu'une compétition pour l'utilisation des terres entre villes et campagnes. La pression sur les ressources naturelles croît et les changements climatiques menacent d'augmenter la rareté de ces ressources. Cette situation pourra être à l'origine de conflits entre Etats ou entre groupes sociaux et engendrera des courants d'émigration.

Ce sont autant de dimensions que l'analyse économique n'est pas à même d'intégrer dans l'estimation des dommages des changements climatiques qu'elle propose. Les problèmes méthodologiques à résoudre sont majeurs et nécessitent des efforts de recherche soutenus. En outre ils exigent une grande prudence dans l'utilisation que les décideurs pourraient faire des estimations monétaires des dommages aujourd'hui disponibles.

Adaptation et développement durable

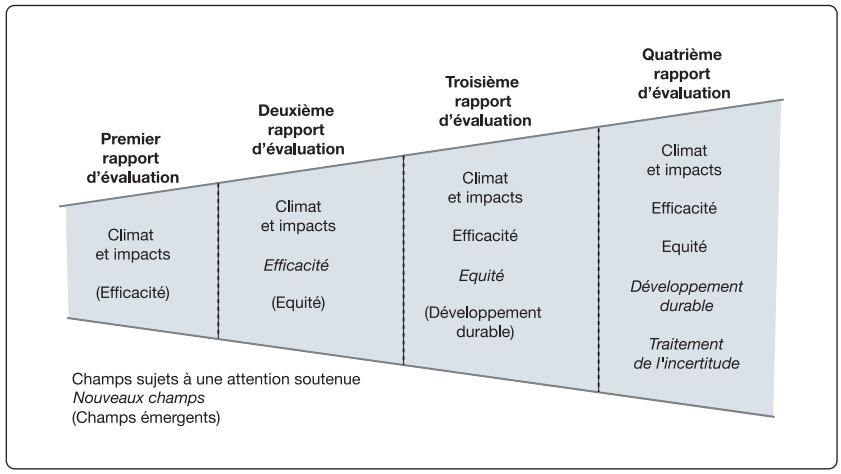
Le contexte

L'adaptation désigne l'ajustement des systèmes écologiques, sociaux et économiques au changement climatique et à ses effets, qu'ils soient avérés ou attendus. Depuis le premier rapport en 1990, toutes les évaluations du GIEC reconnaissent que les réponses en termes d'adaptation pourraient au moins partiellement réduire certains impacts potentiels des changements climatiques. Cependant, l'adaptation n'a fait l'objet que d'une attention très limitée dans les deux premiers rapports du GIEC (Agrawala S., 1998 et 1999), vraisemblablement pour les raisons suivantes. Tout d'abord, l'évaluation des impacts des changements climatiques présente des incertitudes importantes et la compréhension des processus et mécanismes d'adaptation est elle-même plutôt limitée. Ensuite, l'adaptation intervient fréquemment au sein d'un ensemble de réactions qui peuvent être liées à des préoccupations de la société plus larges que le seul changement climatique et qui, par conséquent, pourraient se situer hors du domaine couvert par les évaluations du GIEC. Enfin, jusqu'à la négociation du protocole de Kyoto, le débat politique était essentiellement motivé par la réduction des émissions de gaz à effet de serre. A l'époque, mettre l'accent sur l'adaptation aurait donc pu éloigner la communauté internationale de la nécessité de prendre des engagements de réduction (Kates R.W., 1997).

Le troisième rapport du GIEC (TAR) a été lancé à une période où l'adaptation émergeait lentement comme une réponse politique parallèle dans l'ère post-Kyoto et devenait de plus en plus intimement liée aux priorités plus larges du développement durable. En traitant de manière plus systématique la question de l'adaptation, ce rapport se démarque donc des rapports précédents. Il établit également un lien explicite entre l'adaptation et le développement durable. Ce thème, émergent dans le troisième rapport, sera développé dans le quatrième rapport (figure 2.4, page suivante).

FIGURE 2.4

Evolution de l'attention portée à certains sujets dans les travaux du groupe 2 du GIEC



Source : d'après Pachauri R., 2003.

Les principales conclusions

Les trois résultats principaux du TAR sur les impacts des changements climatiques soulignent encore plus l'importance des réponses par l'adaptation. Premièrement, les projections des changements climatiques sont associées à des effets environnementaux et socio-économiques à la fois positifs et négatifs ; cependant plus l'amplitude et le rythme des changements climatiques seront élevés, plus les effets négatifs seront prédominants. Deuxièmement, les changements climatiques récents ont d'ores et déjà eu un impact perceptible sur les systèmes humains et naturels. Troisièmement, la modification des extrêmes climatiques dans le futur pourrait avoir des conséquences majeures sur ces systèmes.

Ces trois résultats constituent la toile de fond de la discussion sur l'adaptation. Le niveau de dangerosité des changements climatiques dépend pour partie de la probabilité que l'adaptation ait lieu et de son efficacité. Le TAR note que ce sont à la fois les systèmes naturels et humains qui s'adaptent. Pour les premiers, l'adaptation se produit, de façon autonome, en réaction aux changements climatiques ressentis. Ainsi, les saisons de croissance des récoltes peuvent changer, les écosystèmes migrer et leur composition se modifier ; les marécages peuvent se déplacer davantage vers l'intérieur des terres, en fonction de l'évolution de la température, des précipitations et du niveau de la mer résultant des changements climatiques. Pendant ce temps, les systèmes humains non seulement s'adaptent en réaction aux évolutions (par exemple, en modifiant les pratiques agricoles, les primes d'assurance, en comblant les plages érodées...), mais peuvent anticiper et planifier leur réponse aux changements attendus afin de minimiser les dommages (figure 2.5). Des réponses préparées avec soin pourraient augmenter l'efficacité de l'adaptation et la rendre moins coûteuse, quand bien même elles devront prendre en compte les incertitudes associées aux projections des changements climatiques.

3e RAPPORT DU GIEC EXTRAIT

FIGURE 2.5

Types d'adaptation aux changements climatiques

		Principe de précaution	Principe de réaction
Systèmes naturels			• Modification de la durée de la saison de croissance végétale • Modification de la composition des ecosystèmes • Migration des zones humides
Systèmes humains	privés	• Achat de produit d'assurance • Construction de maisons sur pilotis • Modification complète des plateformes pétrolières	• Changements des pratiques agricoles • Modification des primes d'assurance • Achat de climatiseurs
Systèmes humains	public	• Système d'alerte météorologique précoce • Nouvelles normes de construction • Mesures d'incitation en vue de relogement	• Paiements compensatoires, subventions • Application des normes de construction • Entretien des plages

Source
GIEC, 2002, Résumé technique, p. 69 (fig. 9).

Un résultat essentiel du TAR est que, dans la plupart des régions, les principaux modes d'adaptation aux risques climatiques sont moins reliés aux changements, en moyenne, des variables climatiques (comme la température) qu'aux événements extrêmes et à l'évolution de la variabilité climatique résultant des changements climatiques (Smit B. & O. Pilifosova, 2003). Le TAR conclut que, dans bien des cas, l'adaptation réduisant la vulnérabilité aux événements climatiques extrêmes actuels diminuera également celle aux changements climatiques futurs. Compte tenu des incertitudes des scénarios du climat futur, en particulier sur les caractéristiques de la variabilité climatique, promouvoir l'adaptation à la variabilité actuelle pourrait également servir à augmenter les capacités d'adaptation des sociétés au changement climatique.

Le TAR distingue également implicitement ce que nous pourrions appeler la « microadaptation » et la « macroadaptation ». La microadaptation a trait aux réactions de systèmes particuliers pour s'adapter à des changements précis du climat. Elle pourrait requérir une précision plus grande en termes de projection climatique tout en n'ayant qu'un effet global limité. La macroadaptation ne se focalise pas sur une réaction particulière mais sur le développement d'une capacité d'adaptation qui pourrait améliorer l'aptitude d'un système, d'une région ou d'une communauté à s'adapter à une gamme d'impacts potentiels des changements climatiques.

Un autre résultat important est que la capacité d'adaptation varie beaucoup d'une région ou d'une communauté à une autre. En effet, elle est fonction de la dynamique, sociale, économique, technologique, biophysique et du contexte politique, dans lesquels l'adaptation s'inscrit ; elle varie aussi dans le temps, l'espace et selon les secteurs. Le troisième rapport du GIEC observe que : « Given their economic affluence and stability, their institutions and infrastructure, and their access to capital, information, and technology, developed nations are broadly considered to have greater capacity to adapt than developing countries and regions or countries in economic transition (IPCC, 2001a, pp. 879 à 912) ». Du fait de leur dépendance par rapport aux ressources naturelles qui sont directement touchées par les changements climatiques, les pays en développement sont aussi plus sensibles à celui-ci. Par conséquent, les pays les plus vulnérables sont également ceux qui possèdent les plus faibles capacités d'adaptation (IPCC, 2001b, pp. 1 à 18).

Enfin le TAR fait apparaître le renforcement des capacités d'adaptation comme une condition nécessaire pour réduire la vulnérabilité,

particulièrement pour les régions, les pays et les groupes socio-économiques les plus vulnérables. Au vu de ce qui détermine l'aptitude à l'adaptation, les réponses requises pour la promouvoir sont étroitement liées aux objectifs du développement durable (Pittock A.B., 2002). Le TAR conclut que l'équité sociale et les objectifs d'adaptation peuvent être poursuivis simultanément au moyen d'initiatives développant le bien-être des membres les plus pauvres de la société — en améliorant la sécurité alimentaire, en facilitant l'accès à l'eau potable et aux services de santé et en fournissant un toit et un accès aux autres ressources. Etant donné que ces activités constituent déjà le noyau des objectifs du développement, il s'avère nécessaire d'intégrer les préoccupations climatiques dans l'élaboration et la mise en œuvre des actions pour le développement.

LIRE PAGE 75 ▸ L'ensemble de ces questions se retrouve dans la contribution de Michel Petit, qui considère l'apport du TAR à la gestion prospective des ressources en eau au Maghreb.

Penser l'adaptation dans le développement

Si on le compare aux évaluations précédentes du GIEC, le troisième rapport a donné un rôle plus important à l'adaptation. Il a relié explicitement celle-ci aux priorités sociales, en incluant la gestion de la variabilité climatique actuelle et le développement durable. Plutôt que de considérer l'adaptation comme une réponse politique isolée, il a mis en avant la nécessité d'intégrer les réponses climatiques dans les objectifs et les projets de développement. Le GIEC se situe ici à la frontière entre la revue objective de la littérature purement scientifique sur les différents aspects du changement climatique — ce qui constitue son mandat — et les jugements de valeur et les débats plus politiques sur l'aide au développement et l'équité sociale, dans lesquels il ne peut pas s'impliquer. En outre, alors que le troisième rapport note, à juste titre, que la capacité d'adaptation dépend de caractéristiques sociales, il s'est peu étendu sur la raison pour laquelle augmenter cette capacité ne constituerait pas simplement un corollaire d'un meilleur développement économique (lire section 6.2 du Résumé technique et chapitre 18, section 18.1 du Rapport d'évaluation). De la même façon, le rapport observe que les plans et les politiques de développement actuels ne prennent pas souvent en compte les changements climatiques, mais il n'explique pas pour autant comment l'intégration de cette problématique modifierait la planification du développement, compte tenu en particulier de toutes les incertitudes associées à la plupart des projections d'impacts des changements climatiques. Enfin, la discussion sur les liens entre le changement climatique et le développement durable est d'une certaine façon tournée vers l'adaptation et beaucoup moins vers les liens entre la réduction des émissions et le développement, ou entre l'adaptation et la réduction des émissions. Ceci peut s'expliquer partiellement par la séparation trop étanche entre le groupe 2 (impacts, adaptation et vulnérabilité) et le groupe 3 (réduction des émissions) du GIEC. Espérons que la plupart de ces sujets seront mieux traités dans le quatrième rapport du GIEC.

Conclusion

Le groupe de travail du GIEC sur l'adaptation, les impacts et la vulnérabilité joue un rôle essentiel dans l'élaboration de l'expertise sur les changements climatiques. En effet, là où le groupe 1 fournit des projections du climat futur à l'échelle régionale et globale, le groupe 2 donne des indications sur les effets plus tangibles des modifications du climat régional au XXe siècle. Ces informations se situent ainsi à des échelles peut-être plus parlantes pour les décideurs.

Qu'il s'agisse des impacts d'événements météorologiques extrêmes ou de transformations graduelles des systèmes naturels, les observations des changements récents fournissent des informations cruciales pour renseigner la société sur les impacts futurs du changement climatique et, *in fine,* pour la motiver à prendre des mesures pour atténuer celui-ci. Le TAR rapporte en effet que « des liens statistiquement significatifs entre les modifications du climat régional et celles observées dans les systèmes physiques et biologiques ont été documentés en ce qui concerne les environnements terrestres, marins et d'eau douce sur tous les continents ».

Un des enjeux majeurs est de fournir aux décideurs les principaux résultats des travaux des experts sans que soit pour autant perdue de vue la richesse de l'information disponible, y compris les incertitudes associées. En particulier, ce chapitre a souligné les dangers d'une agrégation imparfaite de l'information disponible. Une telle approche risque en effet de masquer certains effets néfastes des changements climatiques sur certaines régions. Elle utilise de surcroît comme indicateur unique la variation du produit intérieur brut, pourtant identifié comme un indicateur imparfait du bien-être. Le groupe 2 ne manque pas de souligner les progrès à faire dans ce domaine de production d'indicateurs chiffrés des impacts, permettant d'effectuer des comparaisons à des échelles pertinentes.

Le rapport souligne également les autres problèmes méthodologiques que pose la projection des effets futurs des changements climatiques sur les systèmes naturels et l'ensemble des activités humaines. Cette tâche cumule les incertitudes produites à chaque étape du travail scientifique : en premier lieu lors de l'élaboration des scénario d'émissions anthropiques pour les différents gaz à effet de serre et les aérosols ; ensuite, lors de la traduction de ces scénarios en termes de forçage anthropique puis de changement climatique à l'échelle globale ; enfin, lors de la déclinaison des différents scénarios climatiques en effets régionaux.

C'est à ce stade de la chaîne de modélisation qu'interviennent les questions sur la vulnérabilité de nos sociétés et écosystèmes et sur nos capacités d'adaptation. C'est sur ces derniers points que les travaux futurs du GIEC seront très attendus, dans la mesure où la négociation internationale accorde une part croissante à l'adaptation, reconnaissant que nous ne pourrons éviter totalement un changement du climat global.

En l'état, le troisième rapport d'évaluation du GIEC sur les impacts offre peu de pistes pour l'action. Toutefois, partant du constat que les pays en développement sont d'ores et déjà très vulnérables à la variabilité « naturelle » du climat, il souligne qu'une meilleure adaptation à celle-ci représenterait un progrès notable pour anticiper les changements climatiques. Il replace ainsi la lutte contre les changements climatiques dans les enjeux, bien actuels, du développement durable.

Quelques réflexions sur la gestion du risque climatique

Pierre Picard

Pierre Picard est professeur à l'université Paris X et à l'Ecole polytechnique. Ses travaux de recherche portent sur les questions d'information et d'incitation dans les mécanismes contractuels, et tout particulièrement sur l'étude des marchés d'assurance.

Si le troisième rapport du GIEC fait apparaître que la température moyenne de surface de notre planète pourrait s'élever de 1,4 à 5,8 °C en 2100 par rapport à l'année 1990 — l'ampleur de cet intervalle reflétant celle des incertitudes scientifiques non levées à ce jour —, il insiste aussi sur l'effet de la concentration atmosphérique de gaz à effet de serre sur la fréquence, l'intensité et la durée des phénomènes climatiques extrêmes comme les sécheresses, les périodes de pluviosité élevée ou les cyclones tropicaux. Par exemple, un accroissement relativement modeste de la température moyenne peut augmenter fortement la probabilité de dépassement de certains seuils pendant les mois d'été. Il en va de même de la pluviosité. Un phénomène extrême telle une crue centennale ayant eu au siècle passé un caractère exceptionnel, aura dorénavant toutes les chances de se reproduire plus souvent et ses coûts économiques et humains deviendront dès lors beaucoup plus préoccupants. Des phénomènes jugés jusqu'ici tellement exceptionnels qu'ils n'étaient pas envisagés ne peuvent plus être ignorés. Si les conclusions des modélisations climatiques sont confirmées, gérer les risques climatiques va devenir une priorité des Etats comme des agents économiques, particulièrement des entreprises.

Cette question de la gestion du risque climatique se pose cependant bien différemment dans les pays du Nord et dans ceux du Sud. Dans les pays les plus riches, la gestion du risque fait partie intégrante du management des entreprises. Face à la montée des extrêmes climatiques, des instruments de couverture existent (qu'il s'agisse de produits d'assurance ou de produits financiers) et on peut s'attendre à leur développement et à leur sophistication pour se protéger de manière plus efficace des incertitudes du climat, au même titre qu'on se protège du vol, de l'incendie ou des implications de sa responsabilité civile. Cette sophistication des instruments de couverture est largement avancée. Les produits dérivés sur indices climatiques, tels ceux créés récemment par Euronext en collaboration avec Météo France (à l'image d'instruments échangés sur le Chicago Board of Trade) sont un exemple de ces innovations financières.

Pour les individus, la question de la protection contre les extrêmes climatiques renvoie souvent à celle des catastrophes naturelles et aux procédures d'indemnisation correspondantes. Le système français d'indemnisation des catastrophes naturelles, régi par la loi du 13 juillet 1982, fait passer l'objectif de solidarité au premier plan, mais il est souvent critiqué parce qu'il n'incite pas à la prévention. Chaque catastrophe de grande ampleur (inondation notamment) conduit de manière répétée à la fois à une satisfaction légitime devant la relative simplicité des procédures d'indemnisation et à un sentiment de malaise face au constat des insuffisances de la prévention. Devant la perspective d'un accroissement des phénomènes climatiques extrêmes,

la recherche d'une meilleure articulation entre prévention et solidarité dans les systèmes d'assurance devrait être une priorité dans les pays du Nord, particulièrement en France.

Dans les pays du Sud, le problème est bien différent et infiniment plus dramatique. L'assurance contre les risques climatiques y est le plus souvent inexistante et, en cas de catastrophe, c'est en général de pure assistance qu'il s'agit, qu'elle soit le fait des Etats ou des ONG. De fait, cette absence d'instruments économiques de protection contre les risques — le climat n'en est qu'un parmi d'autres — est une caractéristique essentielle des situations de grande pauvreté dans lesquelles se trouvent certains pays du Sud. Jacques Weber (2002) montre avec justesse combien il est difficile pour un habitant d'un pays riche — fut-il expert en développement — de comprendre l'attitude à l'égard du risque de ceux pour qui le moindre aléa défavorable peut être catastrophique, parfois même en termes de survie. Il montre comment les populations pauvres pallient le manque d'assurances (ou plus généralement d'instruments économiques de gestion du risque, par exemple l'épargne) par la création de lien social et de réseaux de dettes mutuelles.

Faire entrer les populations les plus pauvres dans un monde où le risque peut être géré de manière économique (c'est-à-dire par des instruments contractuels explicites), mais sans déstabiliser les mécanismes coutumiers implicites qui jouent un rôle crucial, devrait être un objectif majeur de l'aide au développement. Sans gestion du risque, aucune chance de se projeter dans des scénarios qui permettent la création de richesse et le recul de la pauvreté.

Le troisième rapport du GIEC souligne que ce sont souvent les pays les plus pauvres qui seront les principales victimes de ces phénomènes extrêmes. Ceci devrait conduire à donner une priorité aux instruments qui permettent cette gestion du risque. C'est un objectif dont on connaît les difficultés à l'échelle macroéconomique de l'aide au développement proprement dite*. C'est pourtant une direction dans laquelle il faudrait résolument s'engager, par exemple en mettant en place des règles de remboursement des prêts conditionnées à la non-survenance d'aléas climatiques graves. Sur un plan microéconomique, permettre à un plus grand nombre de disposer d'instruments individuels de gestion du risque est essentiel. Le microcrédit est un exemple de ce type de dispositif qui, s'il ne masque pas des formes déguisées d'usure, permet à des populations de gérer leurs risques. L'accroissement des extrêmes climatiques est une des raisons pour lesquelles ce type d'initiative devrait être encouragée.

* Les échecs des organismes internationaux responsables de la stabilisation de certains prix (sucre, café...) nous le rappellent.

Les impacts des changements climatiques sur le continent africain

Marc Bied-Charreton

Marc Bied-Charreton a créé l'Observatoire du Sahara et du Sahel en 1990, puis le service Environnement et ressources naturelles de la FAO en 1994. Ancien directeur de l'UFR des sciences sociales et des humanités de l'université Versailles Saint-Quentin-en-Yvelines, il est professeur émérite et préside le Comité scientifique français de la désertification.

Offrir une synthèse des effets des changements climatiques sur l'Afrique est difficile pour plusieurs raisons. La complexité et l'hétérogénéité des mécanismes climatiques africains en est une. Ainsi, les climats de l'Afrique orientale et australe sont sous influence forte de l'ENSO (El Niño), tandis que ceux de l'Afrique du Nord dépendent de l'oscillation nord-atlantique et ceux de l'Afrique de l'Ouest de la température de l'océan Atlantique (ainsi que d'autres océans, dont l'océan Indien). Par ailleurs, mettre l'accent sur les risques liés au changement climatique dans cette région peut paraître délicat, tant ce continent cumule déjà les handicaps. Ainsi, les économies africaines reposent principalement sur les ressources naturelles et les indicateurs traditionnels situent les populations africaines et leurs pays dans les profondeurs du classement mondial : produit national brut par individu, indicateur de développement humain, échanges commerciaux, nombre de publications scientifiques... Enfin, si le continent africain contribue très faiblement aux émissions de gaz à effet de serre, sa vulnérabilité aux changements climatiques attendus est grande. Outre les tensions accrues dans l'exploitation des ressources naturelles (lire ci-dessous), citons les risques d'augmentation de certaines maladies comme le paludisme, le choléra, la méningite, ceux liés à l'accès de plus en difficile à l'eau potable, et le fait que des populations de plus en plus nombreuses sont localisées dans les zones côtières, en zone méditerranéenne (Egypte notamment) et aussi le long des rivages plats à mangrove de l'Afrique de l'Ouest et de l'Est. Les risques de submersion et d'inondation vont nécessiter une forte coopération régionale, pour l'instant trop faible.

Les augmentations de température prévues se situent aux environs de 0,2 °C à 0,5 °C par décennie, les effets étant beaucoup plus importants sur les marges du Sahara et dans la partie centrale de l'Afrique australe. La pluviométrie devrait baisser, notamment en Afrique du Nord, là où les questions d'accès à l'eau sont déjà cruciales. Elle serait de plus en plus erratique et variable, accentuant les risques de ruissellement, d'érosion et d'inondation. Les conséquences sur le débit des fleuves sont difficiles à prévoir, les modèles produisant des résultats contradictoires (de 30 % d'augmentation à 70 % de réduction pour le Nil). Le déclin de la pluviométrie au Sahel persistera certainement, même si parfois quelques épisodes normalement pluvieux pourront survenir.

L'aggravation de la dégradation des terres entraînera une réduction du potentiel de séquestration du carbone. Le rapport souligne les connaissances insuffisantes sur l'importance relative des causes humaines et des causes climatiques de la désertification, ainsi que des effets rétroactifs de la dégradation des terres sur les changements climatiques. Il y a là des champs de recherche à explorer. Par ailleurs, très

peu de travaux ont été réalisés sur les coûts économiques et sociaux de la dégradation des terres, à l'exception des traditionnelles études coût-bénéfice des projets de développement.

On comprend qu'une baisse de l'humidité des sols entraînerait une diminution de la productivité agricole dans les zones arides et semi-arides. Ceci est donc un avertissement sérieux pour une bonne partie du continent africain : la majeure partie de la population actuelle vit dans des zones semi-arides et subhumides, et plus de la moitié de la population dépend étroitement des productions agricoles et de l'élevage. Quand on connaît le poids de la pluviométrie dans la production céréalière ou laitière il y a tout lieu d'être inquiet pour l'avenir. Au vu des risques de diminution des rendements, les tentatives actuelles de prévision climatique saisonnière doivent être poursuivies afin d'aider les agriculteurs à s'adapter aux variations saisonnières.

La forte dépendance de la production de la biomasse herbacée et de la pluviométrie rappelle la fragilité des systèmes pastoraux. Le rapport esquisse une suggestion intéressante : la population des villes devant augmenter, les régimes alimentaires vont changer et la demande en produits de l'élevage va croître (viande, lait). L'extension des zones pastorales au détriment des espaces agricoles va nécessiter une meilleure gestion de ces activités, mais également un suivi de l'augmentation correspondante des émissions de méthane.

Il faudra donc renforcer les systèmes d'information et d'alerte précoce, les négociations pour la gestion des eaux partagées (superficielles et souterraines), penser à une gestion de l'eau par la demande et non plus par l'offre et mettre au point des stratégies d'adaptation. Le rapport mentionne marginalement certains efforts d'intensification des systèmes agricoles et d'utilisation d'une irrigation d'appoint. Il est toutefois regrettable que les efforts existants dans ces domaines sur le continent africain ne soient pas mentionnés. Citons à cet égard les systèmes d'information et d'alerte rapide développés par les institutions régionales africaines*, qui pourraient rapidement passer de l'information sur la sécurité alimentaire à l'information et à la prévision environnementales. Des projets sont en préparation, avec l'appui de certains pays développés et le Fonds pour l'environnement mondial. En outre, depuis plus de deux ans, une concertation existe sur la gestion des eaux souterraines des aquifères sahariens (programme Système aquifère du Sahara septentrional — SASS — et programme Illumenden).

Parmi les menaces sur la biodiversité, les aires protégées font l'objet d'une attention particulière. Celles-ci vont évoluer et ne pourront sans doute plus remplir leur rôle actuel. Aussi, une approche dite de « corridors protégés » est suggérée, permettant des migrations d'espèces animales en vue de leur protection.

Le rapport rappelle que les conflits armés génèrent des situations très graves en particulier en termes d'adaptation aux changements et que la dépendance économique et la dette des pays africains placent ces derniers dans des positions fragiles. Toutefois, il ne suggère aucune piste alors que certains pays africains font de gros efforts et que des paysanneries trouvent des remèdes à des situations de plus en plus difficiles. Ne pas évoquer la nécessité de zones de prix stables, en particulier pour les cultures vivrières et certaines cultures d'exportation (coton par exemple) constitue un oubli fâcheux. Or, si la production céréalière mondiale va changer au cours du siècle, comme le rapport l'envisage, il faut en prévoir les conséquences économiques sur le prix des céréales et sur l'indépendance alimentaire, au moins à l'échelle régionale, dans les zones sensibles comme le continent africain.

Le rapport souligne que la majorité des Etats africains sont davantage préoccupés par la résolution de leurs problèmes immédiats et qu'ils n'ont pas la capacité de penser des stratégies à long terme. En

* Le Comité inter-Etats de lutte contre la sécheresse au Sahel (Cilss, Afrique de l'Ouest), l'Intergovernmental Authority for Development (IGAD, Afrique de l'Est), le South African Development Corporation (SADC, Afrique australe), le Système mondial d'information et d'alerte rapide (SMIAR) de la FAO (United Nations Food and Agricultural Organization).

conclusion, il souligne que l'Afrique est très vulnérable, qu'une bonne gouvernance assortie de conditions de paix n'est envisageable que dans les années 2020-2030 et que, pour l'instant, les plans nationaux d'action environnementale n'incluent pas la dimension du long terme. On ne peut que souscrire à cette affirmation. Cependant, aucune liaison n'est proposée entre ces plans et les plans nationaux d'action que chaque Etat partie aux trois conventions — sur les changements climatiques, la biodiversité et la désertification — est tenu de mettre en place. Les programmes nationaux de réduction de la pauvreté ne sont pas non plus pris en compte. Or, on ne peut efficacement se préparer aux changements climatiques, lutter contre la dégradation des terres, la désertification et l'érosion de la biodiversité sans intégrer ces impératifs dans des stratégies nationales à long terme de développement durable et de lutte contre la pauvreté.

Les impacts des changements climatiques en France

Michel Déqué

Michel Déqué dirige une équipe de recherche au Centre national de recherches météorologiques. Chercheur en simulation numérique du climat depuis 1980, il travaille actuellement sur la prévisibilité du temps à l'échelle de la saison et les impacts des changements climatiques à l'échelle régionale. Il a contribué au troisième rapport du GIEC (groupe 2) sur ce dernier point.

Le citoyen français ne se serait jamais rendu compte que son climat s'était réchauffé de presque un degré au cours du vingtième siècle si une analyse statistique poussée des archives météorologiques par le service de climatologie ne l'avait révélé. En effet, l'amplitude des variations météorologiques aux latitudes tempérées, accentuée par le caractère irrégulier et brutal des transitions d'un jour à l'autre dû à la turbulence des écoulements atmosphériques, est bien supérieure à cette valeur. En outre, contrairement aux végétaux, l'être humain n'est pas doté d'organes sensibles à une moyenne sur le long terme. En revanche, il est sensible aux phénomènes extrêmes, mais ceux-ci sont parfois trompeurs : ainsi, à Toulouse, le record de froid a été atteint dans les années 80 et le record de chaleur dans les années 20. Quand la double tempête s'est abattue sur la France, fin 1999, suivant de quelques semaines une forte tempête ayant ravagé le nord de l'Allemagne et le Danemark, l'augmentation de l'effet de serre a été rapidement désignée comme responsable, car le besoin de trouver une explication était pressant. Cette tempête était exceptionnelle par son étendue, mais pas par son intensité : en 1987, la Bretagne avait connu des pics de vent plus forts. La direction de la climatologie de Météo France a établi une statistique annuelle des phénomènes de tempête depuis 1950. On n'y constate pas de dérive dans la fréquence de ces événements. La même constatation vaut pour les pluies violentes d'automne qui s'abattent de façon localisée et conduisent parfois à des drames comme à Nîmes ou à Vaison-la-Romaine. L'augmentation des vagues de chaleur et la raréfaction des vagues de froid sont plus faciles à relier au changement climatique, puisqu'un réchauffement en moyenne implique assez naturellement une modification des fréquences des températures extrêmes.

Mesurer l'accroissement des phénomènes violents en évaluant l'augmentation des dégâts subis est trompeur, même si cette dernière est pertinente pour les sociétés d'assurance. En effet, en France, les infrastructures de 2001 ne sont pas celles de 1901. La croissance démographique des villes a conduit à développer l'habitat dans les régions inondables, augmentant la vulnérabilité aux crues les plus fortes.

Face aux interrogations que pose la société menacée, la communauté scientifique ne peut pas se contenter de répondre : « Attendez trente à soixante ans que nos séries de mesures soient à même de confirmer ou d'infirmer l'augmentation de la fréquence de tel ou tel phénomène ». Depuis les années 90, elle dispose d'outils numériques permettant de simuler, heure par heure et sur des décennies, l'évolution de l'atmosphère à des échelles spatiales assez fines. Actuellement, la maille de calcul compatible avec les durées multidécennales est de l'ordre de cinquante kilomètres. Dans un modèle d'atmosphère, certains paramètres, comme la concentration en gaz à effet de serre et en

aérosols, peuvent être imposés de manière externe et modifiés au cours de la simulation. Même s'il n'est pas possible de savoir si la réponse climatique simulée correspondra avec précision à ce qui va se passer, le comportement de ce type de modèle pour la reproduction du climat présent, la prévision météorologique à court terme et la prévision saisonnière nous incite à lui attribuer une certaine confiance. On peut ajouter l'argument, s'il en est un, qu'il n'existe pas d'autre méthode scientifique à notre disposition, tant est grande la complexité des phénomènes en jeu et surtout de leurs interactions.

Les spécialistes européens de la régionalisation du climat se sont regroupés dans un projet baptisé Prudence. La plupart utilisent des modèles sur un domaine limité (en l'occurrence l'Europe) et imposent aux bords de celui-ci les conditions atmosphériques calculées par le modèle britannique. Météo France développe une autre approche en utilisant un modèle couvrant le globe, mais dont la résolution est maximale sur l'Europe. Sa mise en œuvre est différente des autres modèles, mais pas l'exploitation des résultats.

Le scénario de base de Prudence est le scénario A2 du GIEC sur la concentration en gaz à effet de serre. La concentration en aérosols sulfatés, la température de surface des océans et, pour les modèles à domaine limité, le forçage atmosphérique au bord du domaine sont précalculés au moyen d'une version globale à résolution plus grossière du modèle du Hadley Centre. Deux simulations de trente ans, l'une dite de contrôle pour 1961-1990, l'autre dite de scénario pour 2071-2100, sont réalisées. Pour évaluer les incertitudes, d'autres simulations ont été effectuées par certains partenaires, en utilisant des forçages autres que ceux du Hadley Centre, ou le scénario B2.

Décrivons brièvement les caractéristiques de la réponse moyenne des sept partenaires sur la France. Il s'agit d'une différence entre le climat simulé hypothétique (A2) de la fin du vingt-et-unième siècle et celui de la fin du vingtième siècle. On s'affranchit ainsi, en grande partie, des erreurs incluses dans les modèles simulant le climat présent. En ce qui concerne la réponse thermique, comme on pouvait s'y attendre, on obtient un réchauffement général. En hiver, la température moyenne augmente de 3 °C à 4 °C dans les Alpes et de 2 °C à 3 °C dans le reste du pays. En été, l'augmentation est plus forte : 3 °C à 4 °C sur les côtes de la Manche, 5 °C à 6 °C sur un large Sud-Ouest et 4 °C à 5 °C sur le reste du pays. L'impact sur la moyenne des précipitations est différent. En hiver, les précipitations journalières augmentent : 0,1 à 0,5 mm sur l'extrême Sud, 1 à 2 mm sur les régions de montagne, les côtes de la Manche et du nord de l'Atlantique (Vendée et Bretagne) et 0,5 à 1 mm sur le reste du pays. En été, elles diminuent : 1 à 2 mm sur les régions de montagne et 0,5 à 1 mm sur le reste du pays.

Pour étudier les phénomènes extrêmes, l'approche ci-dessus ne suffit pas, car les résultats des modèles sont entachés d'erreurs systématiques différentes, suivant qu'on se trouve dans la plage des valeurs moyennes ou dans des plages situées aux extrémités de la distribution du paramètre considéré, température ou précipitation. Il convient donc de calculer des différences entre climat de référence et climat perturbé pour chaque fréquence de la distribution (que l'on peut exprimer en termes de durée de retour). Si on veut exprimer un impact en fréquence pour un phénomène lié à un dépassement de seuil, par exemple évaluer l'augmentation de fréquence des jours où la température maximale dépasse 35 °C, il faut connaître la distribution observée de la variable météorologique, en l'occurrence la température maximale.

Les travaux dans ce domaine, récemment lancés, ne donnent encore que des résultats partiels. Cependant, suite à la vague de chaleur de l'été 2003 et aux questions pressantes qui ont été posées, nous

avons estimé que, en été, la fréquence du dépassement du seuil de 35 °C se situe, pour le climat de la fin du vingtième siècle, entre 1 % et 5 % pour le Sud de la France et en dessous de 1 % pour le Nord. Pour la fin du vingt-et-unième siècle, nous obtenons des fréquences entre 15 % et 30 % pour le Sud et entre 5 % et 15 % pour le Nord, ce qui augmente en moyenne d'un facteur 5 la probabilité d'occurrence d'une canicule.

L'étude des *maxima* pour les vents est plus complexe, car ces vents sont associés à des phénomènes météorologiques de grande échelle (si on excepte les tornades qui ne sont pas incluses dans le champ d'étude des modèles numériques de climat). Les modèles produisent des tempêtes dont les tailles, les fréquences et les trajectoires sont raisonnables. Mais les simulations de rafales de vent en surface se situent largement en dessous des valeurs observées. L'impact des changements climatiques sur les fréquences de vent violent doit donc être déterminé au moyen d'une approche indirecte faisant intervenir toute la situation météorologique d'un jour donné — et nous travaillons dans ce sens. Cela étant, l'impact des changements climatiques sur les tempêtes est encore en discussion. Il n'existe pas de consensus entre les modèles et, pour un modèle donné, la réponse peut dépendre du critère utilisé pour définir une tempête.

Les inondations, enfin, résultent d'un certain nombre de facteurs, parmi lesquels la distribution des précipitations n'est qu'un élément. Dans un scénario d'accroissement des gaz à effet de serre, nos modèles conduisent à une légère augmentation de la fréquence des fortes pluies en toutes saisons. Ceci est corroboré par les résultats d'autres modèles et n'est pas en contradiction avec la diminution en moyenne des pluies estivales. Comme il n'existe pas de composante hydrologique dans ces travaux, il faut donc se garder de fournir des conclusions trop hâtives sur l'augmentation possible des crues. Par ailleurs, des projets portant sur le Rhône et la Seine étudient l'impact sur les écoulements moyens et non sur les extrêmes, les modèles d'écoulement utilisés étant conçus pour une échelle mensuelle.

A few, ou comment affaiblir un texte du GIEC

Jean-Pascal van Ypersele

Professeur à l'université catholique de Louvain (Belgique) et membre de l'Institut d'astronomie et de géophysique Georges Lemaître, Jean-Pascal van Ypersele est physicien et climatologue. Ses recherches, qui portent sur la modélisation du climat, tentent de contribuer à une approche intégrée de la non-durabilité de notre civilisation. Il est membre du Bureau du GIEC et a été l'un des auteurs du troisième rapport d'évaluation du GIEC (groupe 2).

Genève, 16 heures, vendredi 16 février 2001. C'est en principe le dernier des quatre jours prévus pour la réunion plénière du groupe 2 du GIEC. Les délégués de cent pays sont ici pour « approuver » mot à mot le « résumé pour les décideurs » du groupe 2 (Impacts, vulnérabilité et adaptation aux changements climatiques). Les auteurs ont commencé à rédiger ce texte il y a un an, sur la base du corps du rapport en gestation. Dans le paragraphe qui traite des effets économiques agrégés des changements climatiques, ils ont notamment écrit (avec un niveau de confiance « moyen ») que beaucoup de pays développés connaîtraient des gains économiques nets pour une augmentation de la température globale allant jusqu'à environ 2 °C ; que les effets nets deviendraient panachés *(mixed)* ou neutres dans la gamme approximative de 2 à 3 °C, puis négatifs pour des augmentations plus importantes. On trouve aussi un peu plus bas (sans qualification) qu'il y aura « plus de personnes affectées par les changements climatiques que de personnes qui en tireront profit, même dans le cas d'une élévation inférieure à 2 °C de la température moyenne à la surface du globe ».

Un seuil du même ordre de grandeur se trouve également dans un paragraphe traitant des impacts sur les prix agricoles : les auteurs estiment (avec la qualification « état des connaissances établi, mais incomplet ») que les prix mondiaux de l'alimentation augmenteraient si la température globale connaissait une hausse de 2,5 °C ou plus.

Bien que les auteurs leur accordent un niveau de confiance peu élevé, ces affirmations ont l'avantage de donner un point de repère quantifié qui pourrait servir, avec beaucoup de précautions, à interpréter l'article 2 de la Convention cadre des Nations unies sur les changements climatiques. Et dès que l'on dispose d'un chiffre au-delà duquel il serait raisonnable de considérer que les changements de température globale seraient « dangereux », il est relativement facile de le convertir en concentration de gaz à effet de serre, et donc en scénarios d'évolution des émissions...

Il est clair que ceux qui ne croient pas avoir intérêt à ce que les émissions de CO_2 et autres gaz à effet de serre diminuent préfèreraient que ces seuils soient plus élevés, et aussi moins précis.

Cela n'a pas échappé au chef de la délégation de l'Arabie Saoudite, conseiller du ministre du pétrole. Il nous dit la main sur le cœur : « Pourquoi utiliser des chiffres ? Parlons plutôt de petit, moyen ou grand réchauffement. Le délégué chinois (soutenu par la Thaïlande et Guyana) va plus loin et propose de supprimer le paragraphe. J'interviens au nom de la Belgique pour dire que nous n'avons pas d'autre choix que de conserver ce paragraphe pour expliquer ce que signifie le quatrième « sujet de préoccupation » (effets mondiaux agrégés) évoqué dans la figure 2 du Résumé à l'intention des décideurs [voir

figure 2.3, page 51] que nous venions d'approuver. Le délégué du Royaume-Uni (soutenu par la Nouvelle-Zélande) propose de remplacer « 3 °C et plus » par *a few*, ou par « environ » *(roughly)* suivi d'un chiffre. Les Pays-Bas disent qu'ils pourraient accepter de remplacer « 2-3 °C » par *a few*. Les Emirats arabes unis sont favorables à cette proposition. Dans un souci de simplification du paragraphe, le Royaume-Uni propose d'écrire qu'il y aurait des gains en dessous de *a few* °C et des pertes au-dessus. Dans la salle, le délégué saoudien se concerte avec le délégué chinois. Les Etats-Unis plaident pour garder le paragraphe, car « les décideurs politiques demandent qui gagne et qui perd », mais sont d'accord pour que l'on retire les chiffres. Le délégué saoudien insiste pour garder le paragraphe et dit à présent qu'il est d'accord que ce soit avec ou sans les chiffres, mais qu'il est par contre très important d'indiquer que le degré de confiance est bas. Le président de séance demande leur avis aux auteurs : sont-ils d'accord pour retirer les chiffres et pour simplifier le paragraphe comme proposé par le Royaume-Uni ? Un des auteurs, Joel Smith (Etats-Unis), acquiesce...

Il devient clair que le paragraphe subsistera. Mais j'interviens (soutenu par le Bénin et la Suisse) pour essayer de faire barrage à *a few*. J'explique que, à mon avis, il est très trompeur de remplacer « jusqu'à environ 2 °C » par *up to a few*, qui sera sans doute traduit par « quelques » en français, et donc interprété comme « jusqu'à environ 3 °C ». Je plaide pour 2 ± 1 °C, ou pour l'usage d'adjectifs comme *small, moderate* ou *high* définis par des intervalles de température dans une note de bas de page. Le Royaume-Uni, peu enclin à écouter des arguments qui relèvent d'une autre langue que l'anglais, laisse tomber *« I have no problem with 'a few' »*. Vu l'absence de consensus, Bob Watson, alors président du GIEC, décide qu'un petit groupe de contact, présidé par l'Arabie Saoudite, doit se réunir dans les marges de la plénière pour trouver un accord.

Ce groupe ne termine ses travaux qu'à 20 h 15. Seuls le Bénin et la Belgique ont continué à essayer d'éviter *a few*, sans succès*. Revenus en salle plénière, alors que sont discutés d'autres paragraphes mentionnant des seuils de température, la Russie explique que *a few* veut dire « jusqu'à six » en russe, et plaide pour que l'on utilise des chiffres plutôt que des adjectifs. Le délégué du Royaume-Uni, s'étant sans doute rendu compte de l'erreur stratégique commise quelques heures auparavant en proposant *a few*, essaye de faire marche arrière. Il propose d'insérer une note de bas de page après le premier usage de *a few*, pour indiquer que cette expression se réfère à un « petit » changement de température, le qualificatif « petit » étant lui-même défini dans le résumé technique en référence à une gamme de températures. Il est trop tard, le groupe de contact a créé un précédent et il n'y a plus le temps de rouvrir le débat. Le résumé pour les décideurs du groupe 2 est approuvé le samedi 17 février à 2 h 25 du matin. Le *few* me reste en travers de la gorge.

Avant la réunion de la plénière du GIEC consacrée à la finalisation du rapport de synthèse, j'apprendrai que *a few* s'interprète en chinois comme « de 1 à 10 » ! J'obtiendrai lors de cette réunion-là (à Wembley, en septembre 2001) que chaque traduction de ces *a few* °C dans les cinq autres langues des Nations unies soit accompagnée par l'original anglais entre parenthèses pour tenter de diminuer quelque peu le risque de mauvaise interprétation. Maigre consolation.

La nature n'est pas invitée à ces négociations interminables et souvent très difficiles, pas plus que les victimes potentielles des changements climatiques qui se cachent ici derrière des chiffres ou des adjectifs consensuels. Au GIEC, il n'y a quasiment que des scientifiques et des représentants de gouvernements. Certains me font penser à ces médecins qui discutent d'un « beau cas », au chevet d'un patient mou-

* La version finale du texte en question dit ceci : « [...] dans les pays développés, une hausse de la température mondiale moyenne ne dépassant pas quelques *(a few)* degrés Celsius se traduirait à la fois par des gains et par des pertes économiques (degré de confiance faible) seulement si la température devait s'élever davantage (degré de confiance moyen). [...] Totalisé à l'échelle du globe, le produit intérieur brut (PIB) mondial pourrait augmenter ou diminuer de quelques points de pourcentage pour une élévation de la température moyenne à la surface du globe ne dépassant pas quelques *(a few)* degrés Celsius (degré de confiance faible) et des pertes nettes plus importantes s'ensuivraient dans le cas d'une élévation plus grande (degré de confiance moyen). » (Section 2.8 du Résumé à l'intention des décideurs du groupe 2).

rant, plus soucieux de défendre leur réputation et leurs intérêts que d'être à l'écoute des dernières paroles du malade.

Les impacts des changements climatiques affecteront l'habitabilité même de notre planète. Des dizaines de millions de personnes vont voir leur maison inondée, perdre le fruit de leur travail, voire leur vie ou celle de leurs enfants, parce que les océans se dilatent quand ils s'échauffent et que leur niveau va s'élever, inondant des pays entiers. Mais aussi parce que des pluies diluviennes, comme celles qui ont ravagé l'Europe à la fin de l'été 2002 ou Haïti en mai 2004, s'abattront de plus en plus fréquemment sur bien des régions. L'accélération du cycle de l'eau provoquera davantage de sécheresses dans certaines régions et facilitera les feux de forêts. Des vagues de chaleur tueront par milliers chaque année. Des millions d'hectares de cultures seront brûlés par le soleil et de nombreuses espèces vivantes ou écosystèmes disparaîtront. Des moustiques porteurs de maladies tropicales viendront piquer les banquiers à Wall Street. Plus tard, l'Antarctique et le Groenland commenceront à fondre. Et les sociétés humaines n'ont pas l'expérience d'un climat nettement plus chaud : pour retrouver un climat dont la température globale dépasse de plus de 2 °C celle d'aujourd'hui, il faut remonter plus de 2 millions d'années en arrière !

Les premiers à subir ces impacts seront les pays en développement, qui ont justement le moins de moyens d'y faire face et ne manquent pas d'autres difficultés. Deux milliards de Terriens ne connaissent ni électricité, ni téléphone, ni l'internet et n'ont qu'un revenu inférieur à quelques euros par jour. Plus d'un milliard de personnes n'ont pas non plus accès à l'eau potable et 5 millions meurent chaque année de maladies liées à l'eau. Mais avant la fin du siècle, si le dossier climatique n'est pas pris au sérieux, ce sont probablement plusieurs milliards de Terriens de plus qui risquent de connaître le manque d'eau par exemple. D'ici quelques décennies, les réfugiés du climat se compteront par millions. Même les plus riches ne pourront plus échapper aux conséquences des changements climatiques. On a vu les milliers de victimes en France pendant l'été 2003. Faudra-t-il qu'un cataclysme climatique s'abatte sur la Maison Blanche, comme dans *Colère*, le passionnant roman de Denis Marquet (2001), pour que le problème soit pris au sérieux ? C'est un des paradoxes de la question des changements climatiques : les bases scientifiques sont largement comprises, les chiffres sont clairs, même si certains préfèrent les travestir avec des *a few*. Or, nous allons vers un mur, et nous ne faisons rien, ou presque.

Evaluer les dommages. Des coûts directs aux répercussions socio-économiques, les limites d'une approche statique énumérative

Jean-Charles Hourcade, Philippe Ambrosi

Jean-Charles Hourcade est directeur de recherche au CNRS et directeur d'étude à l'EHESS. Depuis 1987, il est directeur du Centre international de recherche sur l'environnement et le développement (Cired). Il a contribué, en tant qu'auteur principal, au deuxième et au troisième rapport d'évaluation du GIEC.

Chercheur au Cired, Philippe Ambrosi vient d'achever une thèse de doctorat à l'EHESS, intitulée « Amplitude et calendrier de l'action en réponse aux risques climatiques : leçons des modèles intégrés ». Ses travaux portent sur l'évaluation intégrée des politiques climatiques, notamment l'évaluation des dommages et les modes de décision dans l'incertain.

Les « dommages » doivent être considérés comme la résultante sur le bien-être des impacts des changements climatiques au travers d'un ensemble de relations, de rétroactions, de phénomènes d'amplification ou de propagation opérant au sein du système économie-environnement-société.

Ainsi, en supposant que seule l'agriculture est vulnérable au changement climatique, une mesure correcte des dommages ne peut pas être, comme c'est pourtant le cas dans les études disponibles, la perte de production nette du secteur agricole à la suite d'une baisse de la productivité imputable au changement climatique ; il faut en effet remonter tous les chemins qui partent de la baisse de production au bien-être. Après tout, il peut exister des phénomènes de compensation le long de la filière agroalimentaire (adaptation des systèmes de production, appel aux importations, reconversion d'activité...). A l'inverse, l'autosuffisance alimentaire peut être menacée : par exemple, dans les estimations de Mendelsohn *et al.* (1997), le secteur agricole en Afrique souffre (en raison des changements climatiques) d'une perte de production de 132 milliards de dollars, soit 4,7 % du PIB régional. Ce chiffre ne permet pas de rendre compte de la situation de nombreux ménages dont les besoins alimentaires ne seront peut-être plus satisfaits dans ce scénario.

Prenons maintenant l'exemple de la Sibérie à partir de l'étude de Weller (Weller G. & M. Lange, 1999). Le réchauffement climatique dans cette région pourrait conduire à un dégel permanent ou saisonnier du pergélisol, qui ne manquerait pas de causer de graves dommages aux habitations, aux infrastructures collectives (routes, ponts, pistes d'atterrissage) et aux infrastructures du secteur minier (pipelines notamment). En même temps, le recul du pergélisol vers de plus hautes latitudes, le réchauffement du sol, des températures de l'air plus élevées semblent favoriser la mise en culture de nouvelles terres et certaines estimations sont même assez optimistes. Cependant, est-il concevable de développer de vastes plaines céréalières si les routes pour acheminer carburants, engrais et pour transporter les récoltes ne sont pas praticables ? A supposer que cette mise en culture soit réussie, le bénéfice pour le secteur agricole serait-il si grand dans un contexte où les cours sur les marchés mondiaux suivent plutôt une tendance lourde à la baisse ? Une évaluation économique des impacts pour la région ne peut se contenter, comme c'est le cas actuellement, d'une évaluation cloisonnée, secteur par secteur, et d'additionner pertes et gains, mais doit envisager les implications croisées au sein d'une économie.

C'est l'origine de la critique formulée par Fankhauser (1994) à l'encontre de l'approche énumérative, suivie pourtant dans la majorité des grandes études d'évaluation des dommages des changements climatiques. Selon cette approche, les dommages encourus par une région

pour un scénario donné sont calculés comme la somme des pertes dans chaque catégorie retenue (par exemple, pertes simulées pour l'agriculture : 4 % de la valeur ajoutée du secteur) pondérées par leur poids dans l'économie régionale. Une telle approche laisse entendre la possibilité de compensations entre secteurs et n'est pas à même de traduire l'effet d'amplification et de propagation propre à la réaction des systèmes socio-économiques en réponse aux données physiques d'un environnement changeant. En opposition à l'approche énumérative, l'approche d'équilibre général tente de prendre en compte, outre les coûts directs des changements climatiques, les coûts indirects imputables à l'interconnexion des activités au sein d'une économie. La difficulté de construire des modèles d'équilibre général adaptés à la problématique du changement climatique, c'est-à-dire offrant une représentation détaillée des secteurs vulnérables et de leur place au sein d'une économie, explique que l'approche énumérative ait été suivie pour produire les premières estimations économiques des impacts des changements climatiques.

Nous n'en sommes donc qu'au tout premier degré de l'analyse, bien loin d'un outil de quantification permettant une approche coût-bénéfice des changements climatiques, si tant est qu'elle soit valide... Dans tous les cas, l'évaluation des dommages ne peut faire l'économie d'une étude poussée des effets de propagation des impacts des changements climatiques au-delà des activités directement touchées.

Impact des changements climatiques sur les ressources en eau au Maghreb. Conséquences possibles sur l'équilibre de la région méditerranéenne

Michel Petit

Michel Petit a dirigé le département Agriculture et développement rural de la Banque mondiale durant six ans. Il y a ensuite créé et dirigé un groupe spécial d'appui à la recherche agronomique dans les pays du Sud. Professeur d'économie publique à l'Institut agronomique méditerranéen de Montpellier, ses recherches actuelles portent sur les déterminants des politiques agricoles et sur les difficultés de la gouvernance mondiale.

Pour apprécier l'intérêt et surtout les limites du rapport du GIEC, il convient de s'interroger sur la façon dont ce rapport résout des difficultés aussi diverses que la prise en compte de l'hétérogénéité des populations, les différences entre régions climatiques et frontières politiques ou encore les modalités de la propagation régionale et sectorielle des dommages. Quelles questions d'équité pose l'agrégation des dommages à des niveaux d'analyse imposés par le choix des outils, notamment les modèles quantitatifs, mais dont on sait qu'ils recouvrent des situations internes diverses ? Plutôt que de traiter ces questions de façon générale, nous abordons un problème spécifique, choisi à titre d'exemple : en quoi le réchauffement climatique affecte-t-il la gestion des ressources en eau au Maghreb et quel en est l'impact indirect sur l'Europe ? Traiter cette question implique de surmonter les difficultés identifiées ci-dessus, mais aussi et surtout, permet d'illustrer les limites de l'approche choisie par la communauté internationale, y compris le GIEC, pour éclairer l'action politique. En effet, il apparaît que la nature des problèmes à résoudre pour gérer les ressources en eau au Maghreb n'est pas bouleversée par le réchauffement climatique, même si celui-ci rend les problèmes probablement plus aigus et plus urgents.

Même en l'absence de réchauffement climatique, les tendances actuelles montrent que de graves crises se préparent dans les pays du Maghreb si de profondes réformes, aux dimensions économiques, sociales, culturelles et donc politiques, ne sont pas rapidement engagées — en effet, il est prévu que la disponibilité en eau par habitant diminuera de moitié en une trentaine d'années. Les actions nécessaires ont été identifiées, ainsi que les obstacles pour les mettre en œuvre. Plus qu'une question de savoir, ces obstacles reflètent une absence de vouloir et de pouvoir. Ainsi, bien que la plupart des pays reconnaissent la nécessité de multiplier les approches participatives, ainsi que les partenariats et les actions communes à l'échelle régionale et internationale, les obstacles sociaux, culturels et politiques restent considérables.

Dans ce domaine de la collaboration internationale, la région méditerranéenne est exemplaire à la fois en termes d'opportunités et de difficultés : malgré la lourdeur et les difficultés héritées de l'ère coloniale, les responsables politiques européens ont compris que les interrelations entre les pays du nord, du sud et de l'est du bassin méditerranéen sont tellement fortes que seul un projet politique ambitieux offrirait une perspective plausible d'éviter de graves conflits et les conséquences dramatiques que ces conflits risqueraient d'entraîner — les questions compliquées du traitement de l'immigration maghrébine en Europe sont au cœur de cette prise de conscience. Il en est résulté le « processus de Barcelone », dont l'objectif, particulièrement ambitieux, est de mettre en place un « espace de prospérité partagée ». Pour cela, les flux d'aide publique au développement doivent être augmentés et

la coopération régionale renforcée. Alors que le processus a été solennellement lancé en 1995 et que des conférences ministérielles réaffirment régulièrement son importance, les résultats sont très décevants à ce jour. Il y aurait pourtant beaucoup à faire à l'échelle internationale pour améliorer la gestion des ressources en eau et les problèmes qui lui sont liés de lutte contre la pauvreté, notamment dans les zones rurales — par exemple, améliorer la coordination entre les différents ministères ayant à voir, à titres variés, avec la gestion de la ressource (agriculture, équipement, environnement, énergie...). Une aide internationale bien conçue pourrait apporter une contribution significative à la solution de ce problème difficile. Il en est de même pour la gestion des bassins fluviaux, l'aménagement des bassins versants et plus généralement la promotion du développement rural, pour lesquels l'expertise européenne serait tout à fait pertinente, grâce notamment aux programmes Leader*.

Le fait que ces actions ne soient entreprises que timidement illustre la nature des obstacles à surmonter : conflits d'intérêts économiques, insuffisances institutionnelles qui demanderaient de remettre en cause les rapports de pouvoir existants pour être corrigées, finalement volonté politique trop faible pour surmonter les obstacles et surtout arbitrer contre des intérêts particuliers exerçant des pressions sur les pouvoirs publics.

Qu'apporte le rapport du groupe 2 du GIEC pour analyser ces problèmes ? Contribue-t-il à les résoudre ? Consacré aux impacts des changements climatiques, aux adaptations possibles et à la vulnérabilité des sociétés humaines, il devrait avoir un fort impact. Pourtant, je crains que sa contribution au débat public et aux décisions politiques dans le domaine de la gestion des ressources en eau au Maghreb ne soit que très marginale. Certes, et cela est important, le rapport donne des indications convaincantes sur le fait que les problèmes soulevés par cette gestion vont probablement devenir plus aigus dans de nombreux cas et que les résoudre est particulièrement urgent, notamment si, comme le prévoit le rapport, les périodes de sécheresse deviennent plus fréquentes et plus sévères et les inondations plus fortes et donc dévastatrices.

Si la contribution du rapport du GIEC est modeste, il convient de s'interroger sur la nature des connaissances et des informations qui seraient les plus à même de susciter l'action. Se focaliser sur le détail des impacts possibles des changements climatiques, à différentes échelles n'est peut-être pas la meilleure stratégie à cet égard. En effet, on ne peut obtenir que des résultats incertains et pleins de « bruit », du fait des nombreux phénomènes en jeu, autres que les changements climatiques. Pourtant la mobilisation internationale autour du GIEC a été importante et les moyens financiers mis en œuvre, significatifs. Il faut alors regretter que les recherches sur les autres aspects évoqués ci-dessus n'aient pas bénéficié de moyens aussi importants.

* Les programmes Leader de l'Union européenne soutiennent des projets de développement rural fondés sur « une approche intégrée, reposant sur une base territoriale et faisant appel à la participation. On compte trois générations de ces programmes, appelés Leader 1, Leader 2 et Leader +. Ce dernier met l'accent « sur l'émergence et l'expérimentation d'approches nouvelles qui [...] renforceront la politique de développement rural dans la Communauté. »

Mesures de réduction des émissions

Jean-Charles Hourcade

Dans le deuxième rapport publié en 1996, les travaux du GIEC sur les aspects socio-économiques des changements climatiques revêtaient un caractère académique. Ceux recensés dans le troisième rapport sont marqués par les questions des gouvernements et des acteurs économiques relatives au coût du respect des objectifs d'émissions du protocole de Kyoto (1997) et à l'utilité même de ces engagements. L'effort à consentir peut-il affecter gravement le taux de croissance de nos économies ? Un tel effort est-il justifié par les dommages que causeraient les changements climatiques ? Aurait-on dû et pu choisir des cibles plus ambitieuses ? Les mécanismes prévus dans le protocole sont-ils réellement efficaces ou l'ensemble du dispositif est-il intrinsèquement pervers ? Telles étaient les questions en arrière-plan des travaux, questions dont certaines serviront d'alibi au président Bush lorsqu'il rejettera le protocole de Kyoto ou encore questions sous-jacentes à certaines des réfutations médiatiques des politiques climatiques.

Nous les parcourons en nous concentrant sur trois thèmes : les scénarios d'émission de long terme et leurs liens avec le rythme et le contenu du développement ; les coûts d'observance du protocole de Kyoto ; les stratégies de réponse à long terme face à des risques incertains et controversés.

Les incertitudes sur les émissions de long terme

Les scénarios et les tendances de développement

Dans le deuxième rapport du GIEC, les scénarios d'émission de gaz à effet de serre (GES) s'appuyaient sur quelques scénarios économiques réduits à leur plus simple expression : la projection d'un taux

de croissance économique agrégé et des hypothèses sur l'évolution de la quantité d'énergie requise pour un niveau donné de richesse économique. Une telle procédure ne permettait ni de cerner l'ampleur des incertitudes dans les scénarios d'émission ni de comprendre leurs déterminants. C'est ce à quoi se sont attachés les modélisateurs qui ont produit les scénarios dits « SRES » *(Special Report on Emission Scenarios)* à la demande des parties prenantes au débat sur les politiques climatiques. Ces scénarios ont pour objet d'explorer les évolutions possibles des émissions de GES à l'horizon 2100 en l'absence de politiques climatiques spécifiques.

La méthodologie employée dérive d'une conviction forte partagée par la quasi-totalité des spécialistes de prospective, à savoir l'impossibilité de définir le scénario le plus probable. Ceci est dû à l'incertitude pesant sur des paramètres comme la démographie, la technologie, l'évolution des styles de vie, mais surtout au fait que les scénarios de long terme vont dépendre des décisions que prendront nos sociétés dans les années à venir.

Ces incertitudes sont différentes de celles rencontrées dans les sciences de l'univers. En effet, si ces dernières sont confrontées à des phénomènes encore mal connus, à des interactions encore difficiles à comprendre, les lois les décrivant doivent certes être mieux cernées, mais elles existent et sont indépendantes de l'action humaine. En revanche, la prospective économique est confrontée au fait que c'est bien l'évolution de nos comportements et de nos formes d'organisation sociale qui va en grande partie déterminer le futur. Or, ceux-ci dépendent de jugements de valeur, de conjectures, de rapports de force sur lesquels le modélisateur n'a pas à se prononcer : la modélisation doit uniquement assurer la cohérence des scénarios produits en termes de flux matériels et économiques.

Le GIEC s'est accordé sur la production de quarante scénarios correspondant à des visions du futur défendues par tel ou tel groupe d'opinion, sur la base d'hypothèses plausibles, ceci de façon à en comprendre les implications ultimes. Ces scénarios, correspondant à six « familles », ont été produits par six groupes de modélisateurs.

Trois familles de scénarios (A1) envisagent une croissance économique rapide. La population globale augmente fortement jusqu'à la moitié du siècle puis décline légèrement. Le progrès technique est accéléré et se diffuse aisément entre les régions et, ce faisant, entraîne une réduction des inégalités économiques entre les régions. Peut-être parce qu'il correspond à une utopie largement partagée de croissance forte, dans laquelle l'ouverture des frontières permet à la fois d'accélérer le progrès technique et le progrès social, ce scénario a été pris en charge par trois équipes qui ont chacune développé une famille de scénarios correspondant à des hypothèses différentes sur le contenu du progrès technique : une pénétration accélérée des énergies non fossiles renouvelables et de l'énergie nucléaire (A1T) ; une domination des énergies fossiles, charbon principalement, grâce à des gains de productivité (A1FI) ; et une hypothèse médiane dans laquelle le progrès technique bénéficie à la fois aux énergies fossiles et non fossiles (A1B).

La famille de scénarios A2 repose sur la même vision d'ensemble du développement (modes de vie, styles technologiques), mais, plutôt qu'une ouverture générale sur le marché mondial, elle envisage la création de grandes zones économiques davantage repliées sur elles-mêmes, un changement technique plus fragmenté et donc une croissance économique maintenant les écarts de développement entre riches et pauvres.

La famille de scénarios B1 reprend les mêmes hypothèses démographiques que A1 mais explore une transition plus rapide des structures économiques vers les activités de service et d'information. Celle-

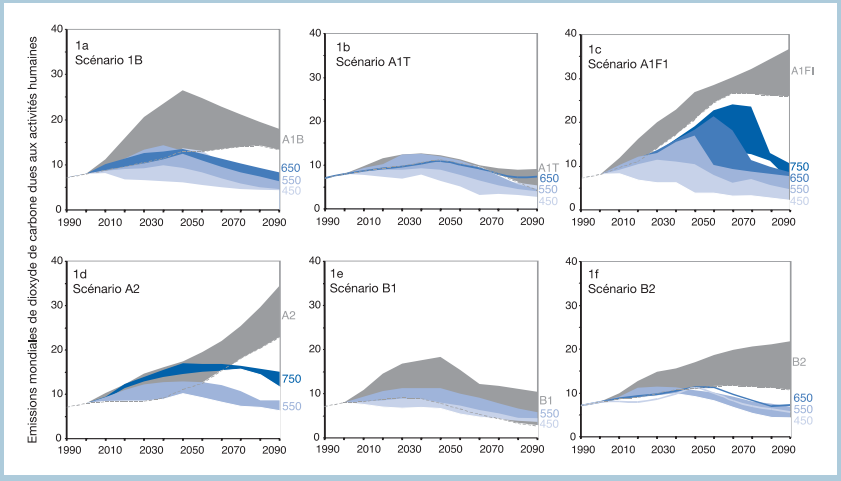
ci s'accompagne d'une baisse de la part de l'industrie lourde dans la croissance et de l'introduction de technologies propres afin de préserver l'environnement local. C'est aussi un scénario de réduction substantielle des écarts de revenu par tête.

La famille de scénarios B2 reprend les mêmes hypothèses que B1 concernant le contenu du développement (dématérialisation, préoccupations environnementales locales) mais, comme dans A2, elle se situe dans un monde où l'espace économique est plus fragmenté et où la population croît de façon plus modérée. Dans la suite du texte, dans un souci d'allègement, les familles de scénarios qui comportent un scénario central pourvu de variantes seront désignées par le terme « scénario ».

3e RAPPORT DU GIEC EXTRAIT

FIGURE 3.1

Comparaison des scénarios de référence et des scénarios de stabilisation.



La figure est divisée en six diagrammes, un pour chacun des groupes de scénarios de référence présentés dans le Rapport spécial sur les scénarios d'émissions. Chaque diagramme indique la fourchette du total des émissions mondiales de CO_2 en gigatonnes de carbone (GtC) émanant de l'ensemble des sources anthropiques pour le groupe de scénarios de référence présenté dans le Rapport spécial (en gris) et la fourchette des divers scénarios d'atténuation évalués dans le troisième rapport d'évaluation conduisant à une stabilisation de la concentration de CO_2 à divers niveaux (en couleur). Des scénarios sont présentés pour la famille A1, subdivisée en trois groupes – le groupe A1B (figure 3.1.a), en équilibre ; le groupe A1T (figure 3.1.b), à prédominance de combustibles non fossiles ; et le groupe A1FI (figure 3.1.c), à forte intensité de combustibles fossiles –, avec stabilisation de la concentration de CO_2 à 450, 550, 650 et 750 ppmv ; pour le groupe A2, avec stabilisation à 550 et 750 ppmv sur la figure 3.1.d, pour le groupe B1, avec stabilisation à 450 et 550 ppmv sur la figure 3.1.e, et pour le groupe B2, avec stabilisation à 450, 550 et 650 ppmv sur la figure 3.1.f. Il n'existe pas de documentation qui évalue les scénarios de stabilisation à 1 000 ppmv. La figure indique que plus le niveau de stabilisation est bas, plus les émissions de référence sont élevées et plus l'écart est important. La différence entre les émissions des divers groupes de scénarios peut être aussi importante que l'écart entre les scénarios de référence et les scénarios de stabilisation à l'intérieur d'un groupe de scénarios. Les pointillés représentent les limites des fourchettes aux endroits où celles-ci se chevauchent.

Source

Résumé à l'intention des décideurs, p. 4 (fig. 1).

Comment lire les scénarios ?

Il importe de ne pas se tromper sur le statut de ces scénarios. Leur intérêt est de prendre en compte des paramètres comme le degré d'ouverture des économies, la dématérialisation de celles-ci, l'évolution des inégalités qui n'ont rien à voir avec les politiques climatiques. On découvre ainsi que les différences entre les émissions de deux familles de scénarios (A1B et A1T par exemple) peuvent être d'un ordre de grandeur équivalent à celui qui sépare, à l'intérieur d'une même famille, le scénario de base et le scénario de stabilisation des émissions enclenchée par un jeu de mesures climatiques. Par exemple, en 2050, dans A1B, les émissions sont de 26 GtC. Et il faudrait les réduire de 14 GtC, soit de 54 %, pour atteindre une concentration globale de 550 ppm, qui représente un doublement de la concentration en CO_2 par rapport à l'ère préindustrielle. Le scénario A1T n'enregistre que 12,5 GtC en 2050 (soit environ moitié moins que le scénario A1B à la même date) ; les baisses d'émissions nécessaires ne sont donc que de 4 % pour atteindre une concentration de 550 ppm. En d'autres termes, les décisions non liées aux préoccupations pour le changement climatique (urbanisme, aménagement du territoire, procédés industriels qui substituent le transport au stockage sur site) ont des impacts d'un ordre de grandeur similaire à celui de la présence ou de l'absence de mesures spécifiques de contrôle des émissions de GES dans le secteur de l'énergie, comme l'illustre John Robinson.

LIRE PAGE 94 ▸

La limite de ces scénarios est que la traduction numérique des visions du futur est un exercice pour le moins risqué. En particulier, nous ne disposons pas aujourd'hui de théories de la croissance de très long terme suffisamment solides pour élaborer des scénarios macroéconomiques garantissant la cohérence entre une vision du monde *(story lines)* et des projections sectorielles (énergie, occupation des sols...). C'est pourquoi les auteurs insistent sur le fait qu'il s'agit d'expériences numériques sur des scénarios qui présentent une cohérence interne, mais que, en aucun cas, ils ne sont probabilisables ou comparables (sauf du point de vue des émissions).

Le refus de donner une indication sur le scénario le plus probable a été largement discuté et cette question sera reprise dans le quatrième rapport du GIEC. Deux raisons militent pour cette position.

Tout d'abord, bien des incertitudes proviennent du mélange de continuités et de ruptures qui caractérisent l'action humaine, que l'on songe à l'impact sur le marché pétrolier de la première guerre du Golfe et de la récente crise irakienne. Mieux vaut donc expliciter les variables susceptibles de déterminer des scénarios différents plutôt que de réduire faussement les incertitudes par un jeu de probabilités qui ne peut venir que d'appréciations subjectives et, de ce fait, arbitraires. Par exemple, il est symptomatique que le scénario le plus émetteur, A1FI, aujourd'hui mis en cause car tirant à la hausse les émissions donc les risques de réchauffement, ait été élaboré à la demande non pas d'ONG écologistes mais du gouvernement américain. Pour celui-ci, montrer la possibilité d'un scénario tendanciel si élevé rendait impossible l'affichage d'objectifs de concentration trop stricts. Ainsi, le même scénario peut-il être utilisé à des fins opposées. Il est donc compréhensible que les experts du GIEC aient voulu se garder de ce type de piège en ne se prononçant pas sur la plausibilité relative des différents scénarios, ne serait-ce que pour garantir la sincérité de l'information délivrée au public.

Par ailleurs, montrer qu'il y a autant de scénarios possibles que de conjectures sur tel ou tel paramètre permet de souligner que le coût des politiques mises en œuvre pour respecter un objectif environnemental donné n'a de sens qu'à l'intérieur d'un même scénario. Or, dans bien des cas de vulgarisation par les médias, des chiffres d'écrits

militants non expertisés sont repris, comme ceux de Lomborg (2001). Et on argue de la différence de produit intérieur brut (PIB) entre le scénario B1, le moins émetteur, et le scénario A1 pour conclure que le scénario le plus « écologiste » coûterait 107 milliards de dollars qui seraient mieux affectés au développement. Or, un tel rapprochement n'a pas de sens ; le scénario B1 traduit des choix de société conduisant à une moins grande marchandisation donc à une moindre croissance de la valeur monétaire du produit ; la différence de PIB avec les autres scénarios ne correspond à rien de transférable à qui que ce soit. Ce qui fait sens en revanche, c'est de calculer le coût, au sein d'un scénario donné, du respect d'une contrainte carbone. En d'autres termes, résister à la tentation de réduire prématurément l'incertitude sur les scénarios du futur n'interdit pas des diagnostics solides sur les coûts des politiques climatiques.

Les coûts du protocole de Kyoto

L'élaboration du troisième rapport du GIEC a coïncidé avec la négociation sur la mise en œuvre du protocole de Kyoto. Le groupe 3 s'est donc penché sur la dimension économique de cet engagement, sur laquelle deux thèses s'opposent. Pour les uns, le protocole serait trop coûteux à mettre en œuvre au regard des gains environnementaux ; pour les autres, le coût relativement faible des réductions justifierait une action beaucoup plus ambitieuse.

Dans l'évaluation des coûts, il convient de bien distinguer deux indicateurs, à savoir le prix du carbone que devra payer le citoyen de chaque pays signataire du protocole de Kyoto en tant que consommateur d'énergie et le coût final qu'il subira en dernière instance une fois que les impacts de la hausse des prix de l'énergie se seront diffusés dans l'ensemble de l'économie. La différence entre les deux types d'indicateurs est importante parce que, contrairement à un choc pétrolier, le prix du carbone ne se traduit pas forcément par une évasion de ressources à l'extérieur du pays ; le surcoût de l'énergie créé par une politique de réduction des émissions est recyclé sur place, soit dans les entreprises du secteur de l'énergie, soit dans les fournisseurs d'équipements moins émetteurs, soit dans la fiscalité générale, dans le cas d'une taxe sur le carbone.

Les tenants de chaque thèse s'appuient sur un débat récurrent depuis les chocs pétroliers et les controverses autour de choix majeurs comme celui de l'énergie nucléaire, que l'on peut caricaturer comme opposant l'optimisme de l'ingénieur au pessimisme de l'économiste. Les premiers viennent souvent en appui à des groupes militants qui revendiquent des politiques ambitieuses tandis que les seconds tempèrent systématiquement cet optimisme et sont invoqués par les tenants de l'inaction. C'est pourquoi, dès le deuxième rapport du GIEC, un effort a été fait pour préciser les termes du débat sur les coûts, que présente Jayant Sathaye. L'incertitude sur les coûts reflète en partie la diversité des approches. En outre, un des objectifs des politiques à mettre en place doit être justement de gérer cette incertitude.

LIRE PAGE 97 ▸

Les coûts dans « le pire des cas »

Pour cerner les principaux enjeux, le plus simple est de partir de la borne supérieure des évaluations des coûts telle qu'elle est fournie par des modèles économiques mondiaux dans les scénarios où on agit seulement sur le CO_2 émis par le secteur énergétique. On ne prend alors pas en compte les puits de carbone (les forêts et les activités agricoles), les gaz autres que le CO_2, les options technologiques à coûts négatifs, les marchés internationaux de permis et enfin les marges de manœuvre fournies par des réformes fiscales.

Moyennant ces hypothèses, les évaluations du coût marginal de réduction du carbone (c'est-à-dire le prix qui devrait être transmis au consommateur) semblent confirmer les craintes des pessimistes : une moyenne de 177 $ pour les Etats-Unis, de 244 $ pour l'Union européenne, de 328 $ pour le Japon (par tonne de carbone). En Europe[1], ceci se traduirait par une augmentation de 0,195 € par litre d'essence. Il n'appartient pas à l'économiste de dire si ce chiffre est ou non acceptable. Annoncé brutalement à l'opinion publique, sans mise en perspective, il déclencherait probablement un rejet. Or, outre le fait qu'il s'agit d'une valeur à atteindre progressivement, il est remarquable qu'on ne ferait alors que retrouver le prix de l'essence que le consommateur a connu dans les années 80 (soit 0,97 €/l en 2002 contre 1,18 €/l en 1980 pour le supercarburant et 0,62 €/l en 2002 contre 0,85 €/l en 1980 pour le gazole).

Une information tout aussi importante fournie par ces travaux est la dispersion des estimations : le coût marginal de réduction du carbone varie, selon les modèles, au moins de 1 à 5 pour une région donnée. Ramené au litre de supercarburant en Europe, cela représenterait une fourchette de quelques centimes à plusieurs dizaines de centimes d'euros, c'est-à-dire une évolution allant d'une augmentation très modérée sur dix ans à un chiffre qui conduit à des inquiétudes légitimes sur l'acceptabilité sociale du dispositif.

L'impact sur la croissance s'avère quant à lui significatif mais modéré. En 2012, la perte de PIB par rapport au scénario de référence serait de 1,33 % aux Etats-Unis, de 0,81 % en Europe et de 0,64 % au Japon. Là encore, une grande variance entre les résultats subsiste. Toutefois, dans le pire des cas, la perte pour les Etats-Unis n'excéderait pas 1,96 % du PIB sur vingt ans, contre 1,5 % en Europe et 1,2 % au Japon. L'interprétation de ces chiffres pour la décision publique et la négociation internationale mérite qu'on s'arrête sur les deux remarques suivantes.

D'une part, même si le consommateur japonais subit une hausse des prix de l'énergie supérieure à celle du consommateur américain, sa perte finale de revenu serait moitié moindre. Ce paradoxe s'explique aisément par le fait que les Etats-Unis se sont engagés à Kyoto sur des objectifs de réduction plus éloignés de leur tendance de référence que le Japon et l'Europe. Dès lors, le fait que le prix du carbone y soit moindre est plus que compensé par le volume important des réductions à opérer. De même, les modes de production et de consommation japonais et européens étant moins énergétivores que ceux des Etats-Unis, ils sont moins sensibles aux augmentations des prix de l'énergie. En d'autres termes, ce sont bien les Etats-Unis qui auraient, selon ces scénarios de politique climatique, subi la perte de croissance la plus importante.

D'autre part, la perte de croissance n'a aucune commune mesure avec les chiffres lancés au public au détour d'une intervention partisane ; l'espace de vraisemblance de la baisse des taux de croissance serait de 0,028 % à 0,097 % pour les Etats-Unis, soit une croissance de 2,97 % à 2,9 % par an au lieu de 3 % et un retard de croissance de deux à huit mois, chiffres bien sûr inférieurs pour l'Europe et le Japon.

Si, dans le « pire des cas », un scénario suivant le protocole de Kyoto ne conduisait pas à une réduction drastique de la richesse des pays signataires, les fourchettes hautes des évaluations pourraient toutefois nourrir des inquiétudes sur les conséquences économiques et sociales des mesures à prendre. En effet, on ne doit pas oublier que des pertes de PIB modestes à un niveau agrégé peuvent masquer, pour un secteur ou une région, des coûts économiques et sociaux importants.

1. D'après les calculs réalisés au Cired à partir des chiffres du GIEC.

3e RAPPORT DU GIEC EXTRAIT

Coût des politiques nationales relatives à la réduction des émissions de carbone

L'ampleur des réductions d'émissions nécessaires pour atteindre un objectif donné est primordiale lorsqu'il s'agit de déterminer le coût brut des mesures d'atténuation, d'où l'importance cruciale du niveau d'émissions de référence. Le taux d'augmentation des émissions de CO_2 est lié à la croissance du PIB, au taux de diminution de la consommation d'énergie par unité de production et au taux de diminution des émissions de CO2 par unité de consommation d'énergie. Dans le cadre d'un projet de comparaison de modèles multiples auquel participaient plus d'une douzaine d'équipes de modélisation du monde entier, le coût brut associé au respect du protocole de Kyoto a été étudié à l'aide de modèles axés sur le secteur de l'énergie. On a tenu compte de l'imposition de taxes sur le carbone pour faire diminuer les émissions et du recyclage des recettes générées par ces taxes sous la forme de montants forfaitaires. Le niveau de la taxe fournit une indication approximative de l'ampleur de l'intervention qui serait nécessaire sur le marché et correspond au coût marginal de réduction permettant d'atteindre une cible d'émissions établie. Le niveau de taxe requis pour atteindre un objectif précis sera déterminé par les sources marginales d'approvisionnement (dont la conservation), en tenant compte ou non de l'objectif.

D'autres facteurs seront également déterminants, dont l'ampleur des réductions d'émission nécessaires, les hypothèses concernant le coût et la disponibilité des technologies libérant des émissions de carbone et de celles exemptes de carbone, la base de ressources en combustibles fossiles, ainsi que l'élasticité prix à court et à long terme. En l'absence d'échanges internationaux de droits d'émission, les taxes sur le carbone qui devraient être mises en place pour que les restrictions imposées par le protocole de Kyoto soient respectées en 2010 varient énormément selon les modèles appliqués.

[...] les valeurs calculées vont de 76 à 322 $ pour les Etats-Unis ; de 20 à 665 $ pour les pays européens de l'OCDE ; de 97 à 645 $ pour le Japon ; et enfin, pour le reste des pays de l'OCDE [Canada, Australie et Nouvelle-Zélande], de 46 à 425 $. Toutes les données sont en dollars américains de 1990. Si les échanges internationaux sont permis, les coûts marginaux de réduction seront de l'ordre de 20 à 135 $/tC. Ces modèles ne tiennent habituellement pas compte des mesures sans regrets, ni des possibilités de réduction du CO_2 par les puits, ou des gaz à effet de serre autres que le CO_2. Cependant, on ne peut établir aucune corrélation stricte entre le niveau de taxe sur le carbone et la variation du PIB et du bien-être, en raison des particularités de chaque pays et de leurs politiques en vigueur (un niveau de taxation unique accablera moins les pays où l'énergie fossile n'occupe pas une part importante de la consommation finale).

Source
GIEC, 2002. Résumé technique, pp. 55 à 56.

Maîtriser les coûts et l'incertitude

Dès lors, l'essentiel des analyses du groupe 3 du GIEC a porté sur les possibilités d'éviter ce « pire des cas » et de réduire à la fois les prix du carbone pour les consommateurs (les plus sensibles politiquement) et les coûts nets en bien-être pour la population (moins immédiatement tangibles mais en réalité plus significatifs). L'analyse a porté sur cinq variables principales, de nature d'ailleurs fort différente.

Les potentiels technologiques à coûts négatifs

C'est sur ce point que se cristallisent les débats entre modèles de prospective technologique et modèles économiques. En effet, les ingénieurs constatent que les techniques les plus efficaces ne sont pas actuellement utilisées. Une analyse systématique des technologies disponibles dans des secteurs comme l'habitat, les transports, l'industrie, l'agriculture, le traitement des déchets et le secteur énergétique lui-même montre qu'environ la moitié du chemin pour atteindre les objectifs de Kyoto pourrait être effectuée à coût nul ou négatif[2]. Le débat porte sur la fraction de ces potentiels qui pourra être réellement mobilisée. Les économistes ont tendance à arguer que ces potentiels, s'ils étaient vraiment intéressants économiquement, seraient déjà réalisés et qu'il doit donc y avoir des barrières à leur utilisation.

C'est ici que l'on doit identifier, comme le font les chapitres 3 et 4 du rapport, les différentes sources d'écart entre potentiels de réduction technologique et économique. Certaines peuvent être supprimées en réformant les marchés existants (élimination des subventions aux énergies fossiles, transparence tarifaire, réduction des coûts d'information, élimination des positions de monopole). D'autres supposent de transformer les comportements (par exemple pour éviter qu'une

2. L'expression « coût négatif » signifie en fait un gain.

hausse de l'efficacité des moteurs ne soit entièrement compensée par un usage plus intensif de l'automobile). D'autres enfin portent sur l'amélioration du service rendu (cas de la qualité de la lumière fournie par des lampes à basse consommation). En l'absence de consensus entre experts, le GIEC ne donne aucun chiffre sur les potentiels à coût négatif réellement exploitables. En revanche, il reconnaît l'existence de tels potentiels et insiste sur le fait que, quel que soit le portefeuille de mesures utilisé pour les mobiliser (normes technologiques, campagnes d'information, taxes), les politiques seront d'autant plus efficaces qu'elles limiteront les incertitudes pour les agents économiques. En d'autres termes, c'est la crédibilité et la stabilité des mesures qui détermineront leur efficacité.

Les mécanismes dits de Kyoto

Une des composantes centrales du protocole de Kyoto réside dans l'instauration de mécanismes de flexibilité, dans le but de prévenir les risques de dérapage des coûts : permis d'émission négociables au sein des pays industrialisés (dits pays de l'Annexe B), mécanismes de développement propre (MDP) pour les échanges entre ces pays et les pays en développement[3]. Contrairement à la caricature médiatique, les systèmes de permis d'émission négociables n'instaurent aucunement des droits à polluer mais au contraire une obligation à réduire, associée à la possibilité d'acheter des permis d'émission à ceux pour lesquels les réductions s'avéreraient plus faciles et moins onéreuses. Les permis d'émission négociables ne font qu'instaurer une marge de manœuvre pour réduire les coûts économiques et sociaux d'une allocation qui pourrait être plus exigeante pour certains pays que pour d'autres. En effet, un pays peut avoir mal négocié ou peut rencontrer des difficultés transitoires pour satisfaire à ses engagements. En important des permis d'émettre en provenance de pays qui se trouvent dans une situation inverse, il pourra tenir ses engagements sans prendre des mesures d'urgence risquant d'être rejetées par sa population. Pour cela, il emploiera un mécanisme assurant que la baisse totale des émissions sera bien celle que souhaite la communauté internationale.

En tenant compte des échanges au sein des seuls pays de l'Annexe B, le prix du carbone baisse de façon significative à 66 $/tC et son espace de vraisemblance se resserre entre 34 et 88 $/tC. Cette baisse des coûts est essentiellement liée au fait que les quotas d'émission négociés par la Russie et l'Ukraine à Kyoto seront très probablement excédentaires par rapport au scénario de base de ces pays et pourront donc être vendus à un coût bien inférieur au coût de réduction des pays de l'OCDE. Dès lors, on peut être tenté de considérer que ces excédents ne correspondent pas à des réductions réelles. En fait, il s'agit d'une erreur de perspective : ce qui compte du strict point de vue environnemental est le total des engagements des pays de l'Annexe B. Il est alors indifférent que la baisse des émissions des pays ex-communistes provienne de la baisse des émissions par unité de production ou d'une croissance économique moins forte que prévu. En revanche, une vraie question est celle du prix auquel la Russie et l'Ukraine vendront leurs excédents puisque ces pays peuvent être tentés de former un oligopole. Ce risque était faible tant que les Etats-Unis participaient au système, parce que les prix d'équilibre en marché concurrentiel se situaient à un niveau assez élevé pour rendre économiquement rationnels de forts abattements au sein des pays de l'annexe B ou via le mécanisme de développement propre.

En tenant compte des possibilités de baisse des émissions dans les pays en développement grâce au MDP, le prix du carbone tombe à 28 $/tC et son espace de vraisemblance est alors de 7 à 49 $/tC. Là encore, comme pour le point précédent, l'incertitude réside dans

3. Les permis d'émission négociables permettent à un pays, qui aurait accepté, sans en prévoir totalement les conséquences, des contraintes trop fortes en matière d'émission, de respecter ses engagements en important des permis d'émission supplémentaires venant de pays qui auraient eu l'habileté diplomatique ou la chance de négocier des objectifs moins contraignants. Le mécanisme de développement propre (MDP) relève d'une logique un peu différente, qui ne se comprend que par le fait que, d'après le compromis de la convention sur le climat signée à Rio de Janeiro (1992), les pays en développement n'ont pas d'obligation de contrôle de leurs émissions dans un premier temps. Pour les intéresser aux politiques climatiques, le MDP prévoit que, sur la base de projets d'investissement, des entreprises des pays dits de l'Annexe B du protocole pourront acquérir des crédits d'émissions supplémentaires en contrepartie des baisses d'émissions qu'ils ont générées dans les pays du tiers-monde.

l'écart entre le potentiel théorique d'économie à travers les mécanismes de Kyoto et le chiffre réalisé. C'est pour ne pas donner une image trop optimiste que le résumé à l'intention des décideurs n'a pas tenu compte des potentiels que le mécanisme de développement propre peut mobiliser. Ceci est dû au fait que, appliqués sans précaution, les modèles surestiment ces potentiels car ils n'intègrent pas les coûts de transaction élevés du MDP, c'est-à-dire les coûts financiers et organisationnels pour repérer, négocier et mener à bien les projets d'abattement des émissions dans des pays tiers.

3e RAPPORT DU GIEC EXTRAIT

Apports des échanges internationaux de droits d'émission

[...] Le tableau 3.1 compare les réductions de coûts découlant des échanges de droits d'émission entre les pays de l'Annexe B, des échanges mondiaux de droits d'émission, et celles réalisées en l'absence d'échanges. Les calculs sont effectués au moyen de divers modèles et intègrent les particularités mondiales et régionales. Dans chaque cas, le but est d'atteindre les objectifs de réduction des émissions fixés dans le cadre du protocole de Kyoto. Tous ces modèles révèlent que plus le marché des échanges est étendu, plus la réduction des coûts est considérable. [...] De façon générale, tous les coûts bruts calculés sans échanges sont inférieurs à 2 % du PIB (on présume [que le PIB] a augmenté significativement au cours de la période étudiée) et, dans la plupart des cas, ils ne dépassent pas 1 %. Les échanges entre les pays de l'Annexe B abaissent les coûts, pour l'ensemble des pays de l'OCDE, à des valeurs inférieures à 0,5 % du PIB et les impacts régionaux varient entre 0,1 et 1,1 %. Les échanges mondiaux réduiraient les coûts à un niveau bien inférieur à 0,5 % du PIB, la moyenne étant, pour l'OCDE, inférieure à 0,2 %.

La question de l'air chaud a aussi une incidence sur le coût de mise en œuvre du protocole de Kyoto. Le récent déclin de l'activité économique qu'ont connu l'Europe de l'Est et l'ex-URSS a entraîné une diminution des émissions de GES. Bien que l'on prévoie un renversement éventuel de cette tendance, il n'en demeure pas moins que les émissions de certains pays devraient demeurer sous le seuil établi par le protocole de Kyoto. S'il en est ainsi, ces pays disposeront de quotas d'émissions en surplus, qu'ils pourront vendre à des pays qui sont en quête de solutions peu coûteuses pour atteindre leurs propres objectifs. Les économies en termes de coûts sont sensibles à l'ampleur des échanges d'air chaud [...]

TABLEAU 3.1. Coût du respect du protocole de Kyoto exprimé en pourcentage de PIB en 2010 (Energy Modelling Forum)

	Pas d'échanges				Echanges entre pays ann. 1				Echanges mondiaux			
MODÈLES	EU	OCDE-E	JAPON	CANZ	EU	OCDE-E	JAPON	CANZ	EU	OCDE-E	JAPON	CANZ
ABARE-GTEM	1,96	0,94	0,72	1,96	0,47	0,13	0,05	0,23	0,09	0,03	0,01	0,04
AIM	0,45	0,31	0,25	0,58	0,31	0,17	0,13	0,36	0,20	0,08	0,01	0,35
CETA	1,93				0,67				0,43			
G-CURED	0,42	1,30	0,57	1,83	0,24	0,61	0,45	0,72	0,06	0,26	0,14	0,32
GRAPE		0,81	0,19			0,81	0,10			0,54	0,05	
MERGE3	1,06	0,90	0,80	2,02	0,51	0,47	0,19	1,14	0,20	0,20	0,01	0,67
MS_MRT	1,88	0,63	1,20	1,83	0,91	0,13	0,22	0,88	0,29	0,03	0,02	0,32
OXFORD	1,78	2,08	1,88		1,03	0,73	0,52		0,66	0,47	0,33	
RICE	0,94	0,55	0,78	0,96	0,56	0,28	0,30	0,54	0,19	0,09	0,09	0,19

EU : Etats-Unis ; OCDE-E : OCDE-Europe ; CANZ : Canada, Australie, Nouvelle-Zélande.

Note : Les résultats du modèle Oxford ne sont pas compris dans les fourchettes rapportées dans le Résumé technique et dans le Résumé à l'intention des décideurs, parce que ce modèle n'a pas fait l'objet d'un examen scientifique suffisamment approfondi (et n'est donc pas approprié aux fins de la présente évaluation du GIEC), et parce qu'il se base sur des données remontant au début des années 80 pour établir les paramètres fondamentaux qui déterminent les résultats obtenus [...].

Sources

GIEC, 2002, Résumé technique, p. 58 (tableau 5).

GIEC, 2002, Résumé technique, p. 58.

Marges de manœuvre fiscales

Les incitations à l'adoption de technologies ou de comportements économes en carbone peuvent être fournies par une panoplie diversifiée d'instruments : normes, accords volontaires, subventions, taxes, permis d'émission négociables. Chacun présente des mérites et des limites du point de vue strictement incitatif. Les chapitres 5 et 6 du rapport en font la revue et soulignent que ces instruments devront être mis en œuvre de façon combinée et que leur mode d'application sera fortement conditionné par les cadres institutionnels préexistants dans chaque pays.

La question qui importe ici est celle de l'impact final de ces instruments sur l'économie. De ce point de vue, les chapitres 6, 7 et 8 du rapport confirment le fait que des instruments comme les accords volontaires et l'allocation initiale gratuite de permis d'émission aux industriels présentent l'inconvénient d'avoir un coût en bien-être pour les ménages supérieur à leur coût direct, alors que des taxes ou des permis aux enchères génèrent un coût en bien-être nettement inférieur. Ceci peut surprendre : ce qui est gratuit coûterait plus cher que ce qui est payant. En réalité, il s'agit d'une fausse gratuité qui s'explique par un mécanisme simple : confrontées à une hausse de leur coût marginal de production, les firmes répercutent au moins une partie de cette hausse sur leurs clients ; or, la hausse des coûts n'affecte qu'une partie de la production (celle qui exige d'aller au-delà des quotas d'émission reçus) ; et comme la hausse des prix de vente porte, elle, sur l'ensemble des produits mis sur le marché, les entreprises bénéficient d'une rente au détriment des consommateurs. De plus, comme cette hausse se transmet de secteur en secteur, elle va, au bout de quelque temps, affecter les produits que ces firmes achètent et l'impact final sur les prix sera supérieur à l'impact immédiat du prix du carbone. Mais — ce point n'est pas contesté — ce mécanisme peut être compensé si l'on procède par voie de taxes ou de permis d'émission négociables vendus aux enchères. En effet, le produit ainsi dégagé peut être utilisé pour réduire les fiscalités les plus néfastes pesant sur la production (charges sociales, TVA, impôts sur les bénéfices). Cela permet de limiter le mécanisme de propagation des coûts entre secteurs et, au lieu d'augmenter la rente perçue par les secteurs polluants, de l'affecter de façon socialement plus efficace. Il y a là matière à un « second dividende », le dividende environnemental, qui s'ajouterait au premier.

Au-delà de la faisabilité politique d'une telle réforme fiscale, question qui se situe hors du mandat du GIEC, la controverse scientifique porte sur le fait de savoir si ce second dividende peut être suffisamment élevé pour compenser l'intégralité des coûts directs des politiques climatiques. En fait, tout dépend des distorsions dues à la fiscalité préexistante. En Europe de l'Ouest, la majorité des simulations recensées dans le rapport fait apparaître qu'une taxe sur le carbone compensée par une baisse des prélèvements sur les salaires conduirait à un résultat net positif sur la croissance.

Le GIEC insiste sur la nécessité de tempérer ce résultat, car il faut prévoir des dispositifs complémentaires pour éviter une dévalorisation du capital des industries fortement consommatrices d'énergie. Dans un système de taxes ou de permis aux enchères, ces entreprises sont perdantes alors que les secteurs plus intensifs en main d'œuvre sont gagnants. De plus, un choc sur leur valeur boursière mettrait en cause, outre leur croissance, leur capacité à financer les adaptations technologiques nécessaires. De même, on doit prêter attention aux effets redistributifs négatifs des taxes sur le carbone. Celles-ci renforcent la fiscalité sur l'énergie. Si cette fiscalité est en grande partie progressive, car elle frappe les plus hauts revenus, elle a également un impact négatif sur certaines populations à bas revenus (qui utilisent des systèmes de chauffage peu efficaces ou qui, en raison de leur lieu de domicile, ne peuvent se déplacer qu'en voiture individuelle). Ceci montre l'importance de mesures spécifiques pour pallier ces effets pervers (allocation gratuite d'une partie des permis d'émission négociables aux industries lourdes, appui à l'équipement en chauffage efficace, par exemple). En aucune façon, cela ne met en cause le fait qu'inscrire les politiques climatiques dans le cadre d'un réaménagement global des fiscalités réduit fortement leur coût total.

3e RAPPORT DU GIEC EXTRAIT

Recyclage de taxes sur le carbone : le double dividende

Afin d'établir une comparaison commode entre les pays, on suppose [...] que les recettes générées par les taxes sur le carbone (ou par les droits d'émission vendus aux enchères) sont recyclées dans l'économie sous la forme d'un montant forfaitaire. [...] Alors que le recyclage des recettes sous forme de montant forfaitaire n'entraîne aucun gain sur le plan de l'efficacité, le recyclage par le biais d'une diminution des taux marginaux d'imposition contribue à éviter certains coûts liés à l'efficacité des taxes existantes ou aux pertes économiques qui en découlent. Cela soulève la possibilité qu'une taxe sur le carbone sans incidence sur les recettes puisse offrir un double dividende, en améliorant l'environnement et en réduisant les coûts du régime fiscal.

On distingue deux types de double dividende : le double dividende faible et le double dividende fort. Dans le premier cas, les coûts d'une réforme axée sur l'environnement, sans incidence sur les recettes, où les revenus fiscaux sont destinés à abaisser les taux marginaux des taxes antérieurement facteurs de distorsion, sont réduits en proportion des coûts générés par la redistribution fiscale aux ménages et aux entreprises sous la forme d'un montant forfaitaire. Dans le deuxième cas, les coûts d'une réforme du régime fiscal axée sur l'environnement, sans incidence sur les recettes, sont nuls ou négatifs. Le double dividende faible reçoit un appui quasi universel, alors que le double dividende fort suscite la controverse.

La façon de recycler les recettes générées par les taxes sur le carbone et par la vente aux enchères de droits d'émission dépend des particularités d'un pays donné. Les résultats des modélisations indiquent que, dans le cas des économies particulièrement inefficaces ou désorganisées sur le plan des questions non environnementales, l'effet de recyclage des recettes fiscales peut effectivement être suffisamment important pour compenser les coûts primaires et l'effet d'interaction des taxes, et donner lieu au double dividende fort. Ainsi, selon plusieurs études portant sur les économies européennes, où les régimes fiscaux peuvent présenter de sérieuses distorsions en matière d'imposition relative du travail, il est possible d'obtenir un double dividende fort, du moins plus fréquemment qu'avec d'autres options de recyclage.

Source
GIEC, 2002. Résumé technique, pp. 56 à 57.

Bénéfices sur l'environnement local

Parce qu'elle implique une baisse de l'usage des énergies fossiles, la réduction des émissions de CO_2 s'accompagne le plus souvent de la baisse d'autres pollutions. Il convient donc de tenir compte du fait que les politiques climatiques contribuent à baisser le coût du respect des réglementations portant sur d'autres pollutions : SO_2, NO_x ou particules. A cela s'ajoutent, même s'ils sont plus difficiles à quantifier, des bénéfices sur la santé et, surtout dans certains pays asiatiques, sur la productivité agricole elle-même. Le GIEC s'est trouvé confronté à la rareté des travaux de modélisation prenant en compte ces bénéfices. C'est pourquoi aucun chiffre détaillé n'est donné, ni dans le Résumé technique ni dans le Résumé à l'intention des décideurs, même si une synthèse est présentée dans les chapitres 8 et 9. Cette rareté des travaux est le symptôme, non du peu d'importance de la question, mais d'une difficulté technique réelle et, par suite, de travaux de recherche encore insuffisants. Il faut d'ailleurs noter que la littérature existante suggère que ces bénéfices secondaires des politiques de réduction du CO_2 sont plus élevés dans les pays en développement que dans les pays développés, compte tenu de la difficulté à mettre en œuvre des politiques efficaces de réduction des pollutions locales. Ce paramètre devrait être pris en compte dans les évaluations du mécanisme de développement propre ou de tout autre dispositif institutionnel permettant de mener des politiques de réduction des émissions de CO_2 dans les pays en développement.

La séquestration de carbone

Le protocole de Kyoto inclut la possibilité de comptabiliser les réductions des émissions par la séquestration du carbone, principalement dans les écosystèmes terrestres, soit via la forêt, soit en transformant les modes d'occupation des sols et des modes de culture. La place à attribuer à la séquestration a fait l'objet de longs débats lors de la négociation de La Haye (2000). En effet, en raison de l'incertitude sur la durée du stockage (feux de forêt, exploitation[4]), la qualité d'une

4. Un accord a été obtenu sur ce point lors de la conférence de Marrakech ; il porte sur 159 MtC à échéance 2010 (Locatelli B. et C. Loisel, 2002).

tonne séquestrée dans la biomasse n'est pas la même du point de vue du contrôle climatique, que celle d'une tonne non émise. Il existe donc un potentiel important de réduction du coût des engagements de Kyoto. Mais du point de vue du contrôle des concentrations de CO_2, tout se joue sur la qualité de la gestion des forêts. L'impact net à long terme sur les concentrations de GES dépend des dispositifs de prévention et de limitation des feux de forêts, ainsi que de la part du bois coupé utilisée comme substitut aux énergies fossiles ou comme bois matériau de courte ou moyenne durée de vie, qui viendrait se substituer à des produits intensifs en gaz à effet de serre (acier, aluminium, plastiques).

3e RAPPORT DU GIEC EXTRAIT

Source
GIEC, 2002, Résumé technique, p. 40.

Les forêts, les terres agricoles et les autres écosystèmes terrestres offrent d'importantes possibilités d'atténuation, même si celles-ci ne sont souvent que provisoires. La conservation et le piégeage offrent un sursis qui permet l'élaboration et la mise en œuvre d'autres options.

Selon le deuxième rapport d'évaluation du GIEC, entre 60 et 87 GtC peuvent être conservées ou piégées dans les forêts d'ici 2050 et 23 à 44 GtC de plus peuvent être piégées dans les sols agricoles. L'évaluation actuelle du potentiel des options d'atténuation biologique est de l'ordre de 100 GtC (cumulatives) d'ici 2050, ce qui équivaut à entre 10 pour cent et 20 pour cent des émissions prévues de combustibles fossiles durant cette période.

Au total, la mise en œuvre des cinq types d'instruments énoncés plus haut aurait pu permettre de contenir les coûts de Kyoto dans des limites faibles, voire pour les plus optimistes, de rendre les coûts nets nuls ou même positifs. Il convient cependant de tenir compte de trois éléments.

Premièrement, les effets de ces variables ne s'additionnent pas complètement : ainsi, des hypothèses très optimistes sur la technologie conduiront à des prix du carbone bas, qui à leur tour diminueront la possibilité d'un second dividende fiscal important. De même, un pays fortement importateur de permis d'émission de carbone ne bénéficiera pas de la baisse de ses pollutions locales.

Deuxièmement, l'existence de stratégies à faible coût global, voire de stratégies « sans regret » à l'échelle macroéconomique, ne doit pas faire oublier que de tels résultats ne peuvent être obtenus qu'au moyen de politiques stables et bien conçues. Et ces politiques ne peuvent pas être conduites sans heurter certains intérêts acquis ou certaines habitudes de décision.

Troisièmement, un des éléments importants est la dispersion des évaluations. Celle-ci reflète les facteurs d'incertitude qui pèsent sur les coûts de Kyoto, incertitude qui touche non seulement le coût des technologies, mais aussi les coûts de transaction qui affectent l'efficacité et l'acceptabilité de telle ou telle mesure. Cet élément devrait donc être pris en compte dans les dispositifs de coordination internationale, de façon à ce qu'on puisse disposer d'une assurance contre les risques de dérapage imprévus des coûts des engagements.

Le GIEC laisse le lecteur se situer entre les évaluations « dans le pire des cas » et celles découlant de la mise en œuvre des différents instruments de réduction des coûts cités plus haut. En effet, l'évaluation dépend de jugements de valeur sur l'opportunité politique, qui n'appartiennent pas au modélisateur. Frédéric Ghersi et Jean-Charles Hourcade utilisent les matériaux du rapport pour montrer l'ordre de grandeur des baisses de coûts que l'on pourrait raisonnablement attendre. Le message central est qu'il est possible de définir des stratégies à faible coût pour respecter le protocole de Kyoto, mais que celles-ci nécessitent un ensemble de décisions parfois difficiles.

LIRE PAGE 100 ▸

Des coûts pour quels bénéfices ?

S'ils apparaissent économiquement supportables, les objectifs de Kyoto impliquent néanmoins un effort important d'innovation institutionnelle à l'échelle nationale et internationale et des décisions qui ne sont pas toujours politiquement populaires. Cet effort est-il réellement utile ? Deux réponses, très différentes mais négatives toutes les deux, peuvent être apportées. Kyoto serait inutile parce que, d'une part, les efforts « tolérables » pour les périodes post-2012 ne sont pas suffisants pour réduire de façon significative les températures et, d'autre part, parce que les efforts à mener pour stabiliser les concentrations à un niveau suffisamment bas deviendront vite insupportables. Ou encore, Kyoto serait inutile parce que les dommages qui pourraient être provoqués par la transformation du climat sont négligeables.

Même si la nécessité d'un effort de contrôle des émissions est reconnue, se pose une seconde question : à quelle date ces efforts doivent être enclenchés ? En d'autres termes, faut-il vraiment respecter les objectifs de Kyoto ou pouvons-nous décaler dans le temps l'essentiel de l'effort ? Cette interrogation explique pourquoi la question du contrôle du très long terme a pris une place aussi importante dans le troisième rapport.

L'objectif de la convention climat, un défi impossible ?

Des coûts de long terme modérés

La première chose qui frappe à la lecture des scénarios du SRES, est qu'aucun ne confirme les discours catastrophistes quant aux coûts de réduction des émissions de GES. Bien évidemment, les coûts des politiques climatiques dépendent du scénario de référence envisagé et des cibles de concentration choisies. Plus les émissions considérées dans le scénario de base sont élevées, plus l'effort de réduction pour une cible donnée de concentration sera draconien. Si on effectue la moyenne des coûts sur tous les scénarios de référence du GIEC et tous les niveaux de stabilisation (de 450 ppm à 750 ppm), on constate que les pertes moyennes de PIB atteignent leur maximum en 2050 (1,5 %) et décroissent lentement jusqu'en 2100. Il faut être rigoureux sur le maniement des indicateurs. Ainsi, les scénarios fondés sur les émissions de base les plus hautes conduisent aux dépenses les plus fortes en valeur absolue ; mais celles-ci restent modérées en valeur relative, tout simplement parce que le PIB est plus élevé dans ces scénarios. Au total, la baisse moyenne atteint 0,003 % des taux de croissance annuels.

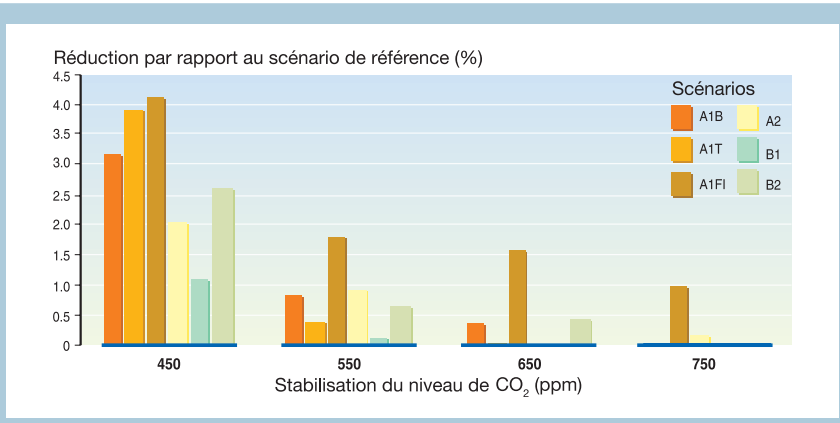
Une analyse plus fine permet de cerner les enjeux. Les coûts de stabilisation des émissions à 650 et 750 ppm sont négligeables. Ces coûts sont modestes pour 550 ppm et croissent très significativement pour 450 ppm avec une perte maximale de 4 % du PIB en 2050 (*cf.* figure 3.2, p. 90), soit une diminution de 0,069 % du taux de croissance. Le point intéressant est que les coûts obtenus pour une cible de 550 ppm sont notablement inférieurs aux quelques évaluations effectuées sur les dommages climatiques. Ces évaluations sont fondées sur une base scientifique trop faible pour être retenues par le GIEC. Mais, comme elles sont souvent invoquées par les partisans de l'inaction, il est important de les rapprocher des coûts des politiques de contrôle des émissions. Ce n'est que pour des objectifs de 450 ppm que les coûts des politiques de contrôle deviennent supérieurs aux « bénéfices » retirés de la baisse des dommages.

3e RAPPORT DU GIEC EXTRAIT

FIGURE 3.2

Réduction moyenne du PIB en 2050 pour différents scénarios de référence et objectifs de stabilisation

Source
IPCC, 2001, p. 548 (fig. 8.18).



La figure 3.2 montre la relation entre la baisse de PIB en 2050, les scénarios de référence utilisés et le niveau de stabilisation visé. Pour un scénario de référence donné, la perte de PIB croîtrait avec la rigueur de la contrainte carbone adoptée. La baisse maximale se produit dans le scénario A1FI, pour lequel les émissions atteindraient leur maximum alors que le scénario B1, beaucoup plus sobre en carbone, subirait les coûts les plus bas.

Ce dernier résultat ne remet pas totalement en cause la rationalité de l'objectif de concentration inférieur à 450 ppm. En effet, les chiffres précédents sont dus à un mécanisme explicable : plus les plafonds de concentration visés sont bas, plus tôt les tendances d'émissions doivent être infléchies en accélérant la mise au rebut des stocks de capital existants. On doit également accélérer la pénétration d'énergies non carbonées sans attendre que leur coût diminue grâce au progrès technique. Mais les modèles utilisés pour ce type de calcul ne prennent pas en compte deux mécanismes qui seraient mis en jeu en cas de contrainte serrée sur les concentrations. Le premier est le recours à la baisse des gaz autres que le CO_2 et à la séquestration géologique ou biologique de carbone. Le second est que les programmes de recherche et développement, d'expérimentation et de soutien au déploiement à grande échelle des technologies alternatives, qui permettent de jouer sur les mécanismes de rendement d'échelle et d'apprentissage technologique, ne seront pas les mêmes si on se fixe un objectif « laxiste » de 750 ppm ou un objectif de 450 ppm. Ces options technologiques et les dynamiques de progrès technique sont représentées dans quelques modèles pionniers, mais n'ont pas été prises en compte par les modèles mobilisés dans les exercices de long terme que nous venons de résumer.

Pour que l'objectif de 450 ppm entre dans le domaine d'une application proportionnée du principe de précaution, il suffirait de prendre en compte la séquestration de carbone dans des conditions écologiquement acceptables et des hypothèses modérées sur les nouvelles technologies.

Tempo de l'action et attitudes face au risque

Plus ambiguës sont les réponses du GIEC sur le tempo de l'action, c'est-à-dire la date à laquelle l'essentiel des efforts de réduction doit être enclenché. Le rapport permet cependant de comprendre en quoi ce débat n'est pas strictement technique mais renvoie aux attitudes à l'égard du risque climatique et aux critères qui fondent la décision. Le débat peut être résumé à partir de deux attitudes distinctes par rapport au risque.

Une première attitude conduit à une approche dite de coût-efficacité : minimiser le coût pour atteindre un objectif fixé à l'avance. Or,

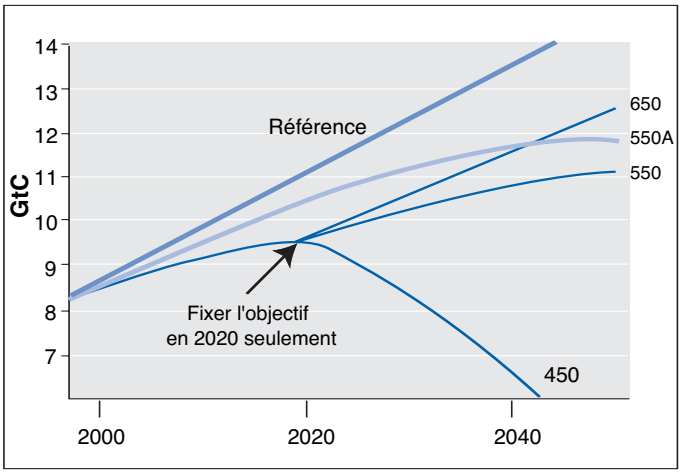
nous ne savons pas aujourd'hui laquelle des cibles possibles (450 ppm, 550 ppm, 650 ppm par exemple) s'avérera justifiée *in fine* par les risques encourus. Les données scientifiques ne permettant pas de trancher ni même de fonder des probabilités sur des bases objectives, le choix entre ces cibles pour un coût économique donné est affaire d'appréciation et de jugement de valeur sur le degré de précaution souhaité.

Supposons que l'on choisisse aujourd'hui une cible de 550 ppm ; à horizon 2010, seul est nécessaire un décrochement faible à modéré par rapport aux tendances en cours. La raison est la suivante : pour cette cible, il vaut mieux éviter la mise au rebut du capital existant, attendre la baisse des coûts des technologies peu émettrices et faire payer une part plus importante du fardeau aux générations futures, qui seront plus riches que les générations actuelles.

3e RAPPORT DU GIEC EXTRAIT

FIGURE 3.3

Stratégie optimale de réduction des émissions de dioxyde de carbone fondée sur une approche coût-efficacité



Source
GIEC, 2002, p. 69, Résumé technique (fig. 10.a).

Raisonner ainsi peut toutefois être dangereux et n'est pas cohérent avec les incertitudes intrinsèques du dossier climat. Supposons que, ayant visé un plafond de 550 ppm, de nouvelles informations sur les effets des changements climatiques amènent à conclure, en 2020, qu'il serait souhaitable de rester en dessous d'un plafond de concentration plus sévère — 450 ppm. Pour rattraper le temps perdu, il faudra accélérer les réductions, donc le taux de renouvellement du capital installé et la pénétration des technologies nouvelles. Des travaux de modélisation ont été réalisés pour tenir compte de ce risque. Ils montrent que prendre 550 ppm comme cible certaine ou comme moyenne de trois valeurs (450 ppm, 550 ppm, 650 ppm) avec un même coefficient de probabilité ne conduit pas du tout au même résultat. Dans le second cas, un décrochement important à court terme devient économiquement rationnel, car les coûts du freinage accéléré qui serait nécessaire dans le cas d'une cible de 450 ppm l'emportent sur ceux d'un ralentissement trop précoce des émissions au cas où la cible de 650 ppm s'avèrerait suffisante. Nous aurions ainsi intérêt à suivre la courbe basse de la figure 3.3 jusqu'en 2020.

La seconde attitude exige de justifier le choix de la cible. On cherche alors à trouver l'optimum économique entre le coût de réduction des émissions et les dommages dus aux changements climatiques. Cet arbitrage suppose que l'on se dote d'évaluations économiques des dommages, même si les bases scientifiques de ces évaluations sont fragiles. Dire en effet que cela « vaut le coup » de viser un plafond de

450 ppm plutôt que de 550 ppm suppose que l'on attache aux dommages ainsi évités une valeur monétaire supérieure à celle des coûts de réduction supplémentaires consentis.

La figure 3.4 montre une simulation où l'on affecte une probabilité de 5 % à un scénario de dommages élevés, avec comme précédemment, l'idée que la bonne information ne se révèle qu'en 2020. Contrairement au schéma précédent, cela aboutit à reporter vers 2020 l'essentiel des efforts. En fait, ce scénario est fondé sur une certaine vision des impacts des changements climatiques : des dommages croissant en pente douce, sans effet de seuil ni phase d'accélération. Ce résultat se fonde sur l'intuition suivante : il est préférable de reporter l'action tant que la croissance annuelle des dommages reste inférieure au taux d'actualisation, puisque, en n'investissant pas dans leur prévention aujourd'hui, on permet à des générations plus riches de « se payer » la compensation des dommages soit par l'adaptation soit par l'acceptation de dommages résiduels dans un contexte de niveau supérieur de richesse.

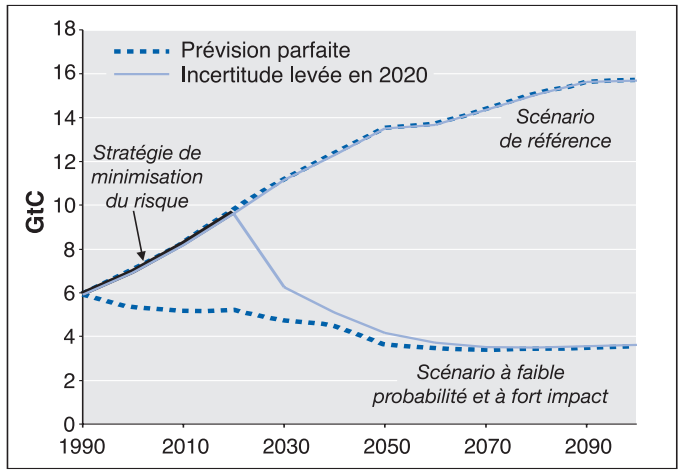
Or, les possibilités d'apparition de seuils dans les dommages sont multiples : non-linéarités du système climatique lui-même, rupture dans les possibilités d'adaptation des écosystèmes en cas de trop forte accélération des changements, risques d'accidents climatiques depuis la multiplication des anomalies de El Niño jusqu'au ralentissement de la circulation thermohaline, enfin non-linéarités des systèmes économiques, par exemple la fragilisation d'une économie régionale due à la disparition d'une ressource halieutique. Tout ceci reste mal connu mais, pour une même hypothèse sur le montant total des dommages, les conclusions des exercices de modélisation conduisent à un tempo de l'action plus rapide si l'on fait l'hypothèse de non-linéarités dans les changements climatiques.

3e RAPPORT DU GIEC EXTRAIT

FIGURE 3.4

Stratégie optimale de minimisation du risque pour un scénario de faible probabilité et de fort impact, fondée sur une approche d'optimisation coûts-avantages.

Source
GIEC, 2002, Résumé technique, p. 69 (fig. 10.b).



Conclusion

Les conclusions majeures du rapport du point de vue des débats publics sur les politiques climatiques peuvent être résumées en quatre points.

Premièrement, la réduction des émissions de CO_2 n'engendrerait pas les désastres économiques annoncés ici ou là. En revanche, il est clair que le coût induit est incertain et il nous semble que cette incertitude devra être prise en compte dans la réflexion sur les dispositifs de coordination internationale à mettre en place. Dans ce contexte, il

importe de noter que les politiques de réduction des émissions à moindre coût social (voire à effet net positif) sont celles qui se fondent sur des outils plutôt impopulaires, comme les taxes ou les permis d'émission négociables. Le coût final du contrôle des émissions dépendra donc du degré d'acceptation, et donc de l'explication, de l'importance de payer le juste prix pour utiliser des combustibles fossiles et émettre du CO_2.

Deuxièmement, nous ne pouvons pas évaluer les politiques prises aujourd'hui en les mesurant à l'objectif de stabilisation du climat global. Ainsi, critiquer Kyoto parce qu'il ferait gagner moins d'un dixième de degré sur la hausse des températures projetée d'ici 2100, c'est feindre d'ignorer que nous sommes dans une logique de décélération progressive des émissions : l'objectif du protocole de Kyoto ne représente qu'un tout premier pas. En sens inverse, l'objectif fixé à Kyoto n'a pas de valeur en soi : manquer la cible de Kyoto de quelques millions de tonnes est moins grave que retarder l'émergence d'une coalition capable de s'engager sur des efforts de long terme.

Troisièmement, l'arbitrage sur le niveau d'action à entreprendre dépendra *in fine* de l'attitude collective face au risque. Devons-nous agir sans certitude absolue sur les dangers des changements climatiques ? Pendant longtemps encore, l'évaluation des impacts du changement climatique restera un exercice difficile que le quatrième rapport du GIEC tentera de mener. En revanche, le troisième rapport montre que plus l'action pour réduire les émissions sera reportée, plus les marges de manœuvre se réduiront et certains objectifs de stabilisation du climat deviendront hors de portée.

Enfin, le GIEC souligne à quel point les efforts spécifiques de réduction des émissions pour atteindre un objectif donné diffèrent selon les scénarios de développement économique et social et leur contenu technologique. Ces scénarios sont guidés par des choix sans lien avec l'environnement ou les politiques énergétiques (depuis l'ouverture du commerce mondial jusqu'aux politiques de la ville). Ces choix peuvent donc avoir des effets à la hausse ou à la baisse sur les émissions équivalents aux économies de CO_2 à attendre des politiques climatiques *stricto sensu.* Eviter certaines bifurcations, opérées en prenant des décisions sans s'interroger sur leur viabilité de long terme, constitue un enjeu déterminant pour la faisabilité de cibles ambitieuses de stabilisation du climat. Cette question est primordiale pour les pays en développement : ceux-ci font aujourd'hui des choix qui structureront pour longtemps leur mode de croissance, leurs besoins énergétiques et leurs trajectoires d'émission de gaz à effet de serre. En cela, la prévention du changement climatique global s'insère plus que jamais dans une logique de développement durable.

Quelques commentaires sur les coûts de l'observance du protocole de Kyoto

John Robinson

John Robinson est professeur à l'université de Colombie britannique (Canada), au Sustainable Development Research Initiative. Il dirige plusieurs programmes de recherche centrés sur les politiques climatiques. Il travaille notamment sur les dimensions humaines du changement climatique. Il est l'un des auteurs principaux du troisième rapport du GIEC (groupe 3).

La série d'articles sur le coût des réductions des émissions de gaz à effet de serre envisagées dans le protocole de Kyoto témoigne d'un débat mal engagé. En effet, ce débat part du postulat que la question des coûts et des bénéfices de la réduction des émissions de gaz à effet de serre est pertinente dans l'absolu. Or, ces coûts ou bénéfices ne peuvent être calculés qu'à partir d'un scénario de référence avant toute politique de réduction des émissions. Comment définir ce scénario (souvent appelé de façon trompeuse *business-as-usual*) pour ensuite identifier des mesures de réduction et calculer leur coût par rapport à ce scénario de référence ?

Un tel raisonnement pose plusieurs problèmes. Premièrement, il n'existe pas un scénario de référence unique, mais plusieurs modes d'évolution possibles de l'offre et de la demande d'énergie dans le futur, donc plusieurs bases pour le calcul des coûts et des bénéfices. Comme le notent les rapports du groupe 3 du GIEC en 1995 et en 2001, l'estimation des coûts dépend du scénario de référence. Notre incapacité totale, ces trente dernières années, à prévoir avec précision la demande d'énergie future devrait nous donner à réfléchir lors de la publication d'une nouvelle estimation des coûts de réduction atteignant des montants énormes.

Deuxièmement, les hypothèses structurelles des modèles utilisés pour prévoir l'offre et la demande d'énergie font du scénario de référence le scénario le moins cher, un scénario d'équilibre sans perturbation. Toute déviation par rapport à celui-ci sera coûteuse par définition : tous les choix qui n'y figurent pas sont plus chers que ceux qui s'y trouvent. Les modèles n'analysent pas si ces choix sont plus coûteux — ils le sont par hypothèse —, ils se contentent d'évaluer le surcoût. La plupart des modèles ne tiennent donc aucun compte de l'existence éventuelle de mesures dites « sans regret » qui généreraient des économies, et non des coûts, et vaudraient donc la peine d'être prises dans tous les cas. Or, un courant de pensée économique néoclassique affirme que des mesures de ce genre ne peuvent, en principe, pas exister : si c'était le cas, elles auraient déjà été prises (de même qu'il ne peut pas y avoir de billet de vingt dollars sur le trottoir, sinon quelqu'un l'aurait déjà ramassé). Outre que ce raisonnement témoigne d'une foi assez touchante en l'efficacité des marchés, l'existence de barrières significatives, institutionnelles notamment, semble suffisamment avérée pour qu'existe un potentiel de mesures « sans regret ». Réaliser ce potentiel permettrait de faire des économies et de contribuer ainsi au financement de mesures plus coûteuses.

Troisièmement, presque aucune des analyses ne tient compte des bénéfices liés à l'atténuation des changements climatiques, en raison notamment des difficultés à estimer le coût des dommages. Le principe général est clair. Nous voulons réduire au minimum le coût net

des politiques climatiques. Nous devrions donc être prêts à payer à concurrence du coût des dommages évités, et probablement à ajouter une prime de risque. Cela signifie *a fortiori* que nous devrions appliquer toutes les mesures « sans regret » et toutes les autres mesures moins chères par unité d'énergie que la somme des dommages par unité d'énergie que nous nous attendons à voir causés par les changements climatiques et de toutes les primes de risques que nous voulons y ajouter. Bien qu'il soit extrêmement difficile d'estimer le coût de ces dommages, les évaluations préliminaires reprises par le GIEC dans son rapport de 2001 sur un grand nombre d'impacts montrent des coûts potentiellement très élevés par rapport aux cas de référence considérés.

Quatrièmement, l'investissement dans l'efficacité énergétique et les énergies renouvelables devrait stimuler des innovations technologiques et institutionnelles conduisant à emprunter des voies plus souhaitables que celles choisies. Or, de telles considérations ne sont jamais prises en compte. En d'autres termes, le futur le plus probable peut ne pas être le plus désirable. Nous devrions moins nous attacher à essayer de prévoir l'avenir qu'à chercher à nous orienter vers des sentiers socialement, écologiquement et économiquement plus souhaitables.

Les travaux du GIEC ont montré que la réalisation du développement durable est plus efficace qu'une politique spécifique de lutte pour atténuer les changements climatiques et leurs impacts, ou pour s'y adapter. La raison en est simple. Les sentiers de développement durable s'accompagneront d'émissions très faibles sans recourir à des politiques climatiques : les réductions résulteront de mesures prises pour d'autres raisons. Stabiliser les concentrations atmosphériques à un niveau raisonnable représentera alors un effort mineur. En revanche, si nous empruntons un chemin intensif en émissions, l'intervention au titre du climat sera très coûteuse. En outre, l'introduction précoce de technologies moins émettrices en carbone aurait également pour effet de diminuer les coûts grâce aux économies d'échelle et à l'apprentissage. De ce fait, les estimations de coûts statiques apparaissent hors de propos. On ne peut que comparer le coût total de systèmes qui fournissent des services spécifiques dans tous les scénarios alternatifs. Et les scénarios récents du GIEC, qui prévoient les émissions les plus faibles, ont tendance à totaliser les coûts les plus bas.

Ce point est important car il y a beaucoup d'autres raisons que le climat d'emprunter une voie de développement durable. Et un grand nombre d'entre elles offrent des possibilités de développement économique. Pour ne citer qu'un exemple, la population urbaine du monde va augmenter de 50 % d'ici trente ans. Toutes les villes seront confrontées aux mêmes défis : qualité de l'air, approvisionnement en eau, énergie, transports, utilisation des sols, emploi, logement, services de santé et traitement des déchets. La plupart des villes se comportent de manière inappropriée pour répondre à ces défis. Or, la croissance des populations et des économies va rendre la tâche plus difficile dans les prochaines décennies.

La Banque mondiale estime que des milliers de milliards de dollars seront investis dans la construction des nouvelles infrastructures urbaines au cours des dix prochaines années. Qui va participer à cette entreprise ? Il nous semble que ceux qui fourniront des technologies et des services durables jouiront d'un avantage concurrentiel majeur. Ce que Mike Harcourt appelle le *tsunami* (raz-de-marée) urbain offre une occasion significative de retour positif sur investissement.

Les objectifs de Kyoto se situent dans la même perspective. Ceux qui arriveront les premiers avec des solutions viables réussiront mieux économiquement et aborderont mieux les problèmes globaux. De ce point de vue, parler des coûts du protocole de Kyoto c'est risquer de passer à côté de l'essentiel. Tous les investissements génèrent des coûts, mais les bons investissements offrent un retour positif dans le futur.

Ainsi, les politiciens qui expriment des craintes sur les coûts du protocole de Kyoto envisagent la question sous un angle erroné. Premièrement, ces coûts ne sont pas aisément calculables. Deuxièmement, les estimations ignorent la possibilité de réductions à coûts faibles ou négatifs. Troisièmement, les analyses excluent l'aspect bénéficiaire de l'équation et surestiment donc les coûts nets. Et quatrièmement, elles ne tiennent pas compte du fait que, pour prospérer, les économies auront besoin d'investir dans l'innovation pour développer des avantages compétitifs dans des domaines où existent un fort potentiel économique et une demande publique pour améliorer les pratiques. Ne pas tirer parti des opportunités de Kyoto n'est pas seulement une attitude de courte vue, c'est le meilleur moyen d'enclencher un processus tendant vers une obsolescence tant économique que technologique.

Comme l'a dit il y a peu mon collègue Rod Dobell à propos du troisième rapport du GIEC au sujet de la difficulté de réaliser les objectifs de Kyoto, « dans le monde actuel, toute économie qui ne renouvellera pas complètement son capital social à un horizon de quinze ans pour adopter des technologies nouvelles répondant à des conceptions et des situations nouvelles ne sera pas suffisamment dynamique pour vivre dans la nouvelle économie d'innovation fondée sur les nouveaux savoirs ».

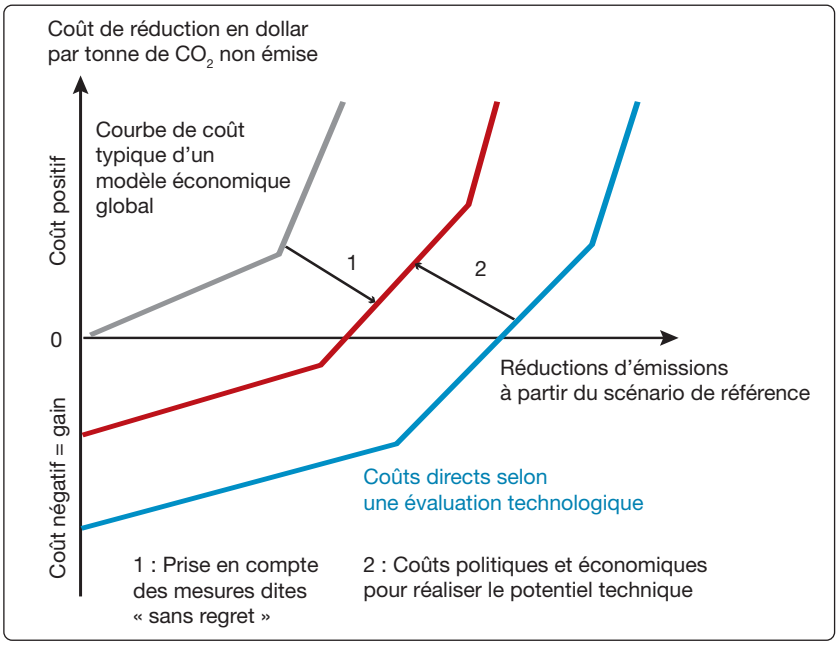
Potentiels et coûts de réduction des émissions de gaz à effet de serre. Evaluation des options technologiques

Jayant Sathaye

Jayant Sathaye dirige l'International Energy Studies Group au laboratoire Lawrence Berkeley du Département fédéral de l'énergie des Etats-Unis. Ses recherches portent notamment sur la modélisation des coûts de réduction des émissions de gaz à effet de serre. Il est l'un des principaux auteurs du troisième rapport du GIEC (groupe 3).

La quantité des émissions nettes de gaz à effet de serre peut être réduite en utilisant plusieurs options technologiques. Dans le secteur de l'énergie, on distingue celles qui réduisent l'utilisation d'énergie de celles qui diminuent la teneur en carbone des sources d'énergie. Dans le secteur forestier, il peut s'agir de freiner la déforestation, de séquestrer le carbone. Pour les gaz autres que le dioxyde de carbone (CO_2), les options sont avant tout centrées sur la réduction des émissions et sur la substitution par des gaz à forçage radiatif plus faible. Des politiques peuvent être mises en œuvre pour promouvoir l'utilisation de ces technologies.

Quelles sont les possibilités de réduire les émissions de gaz à effet de serre et quel est leur coût ? La réponse à cette question varie fortement selon le modélisateur et le modèle utilisé. Beaucoup de technologues affirment que les possibilités techniques sont nombreuses et leurs coûts négatifs ; certains économistes soutiennent le contraire. La montagne d'analyses et de données accumulées sur ce sujet ne parvient pas à réconcilier ces vues. Les chapitres sur la technologie du rapport du GIEC (chapitres 3 et 4) présentent des estimations de coût de réduction radicalement différentes de celles obtenues par les modèles économiques globaux, présentées dans le chapitre 8 (figure ci-dessous).



Pessimisme économique des modèles globaux et non prise en compte des coûts de mise en œuvre dans les évaluations technologiques

Ces différences ont plusieurs causes : l'utilisation de différents taux d'actualisation ; une inclusion partielle des coûts ; une inclusion partielle des options de réduction ; des dates de démarrage variables selon les modèles ; des durées de vie du capital physique différentes ; l'hypothèse que toutes les mesures à coût négatif ou faible sont automatiquement adoptées dans le scénario de référence ; des échanges de permis d'émission de carbone évalués sans coût de transaction ; une prise en compte inadéquate des barrières à la pénétration des technologies.

Si les points ci-dessus jouent un rôle important pour expliquer les différences d'estimation des coûts entre modèles de type économique global et modèles de type technologique, d'autres points reflètent ces différences au sein des modèles économiques seuls. Ils comprennent le traitement des changements technologiques, des bénéfices pour l'environnement local, du recyclage des revenus des taxes, de l'étendue des possibilités de substitution des énergies et d'autres intrants pour la production.

On peut remédier au problème des taux d'actualisation et de la durée de vie du capital en utilisant des valeurs équivalentes dans les différents modèles. On peut aussi corriger la prise en compte partielle des coûts dans un modèle technologique qui ne tiendrait pas compte des changements des coûts de main d'œuvre et de maintenance lorsqu'une technologie de réduction vient se substituer à une technologie du scénario de référence. Mais, pour cela, il est nécessaire de disposer de données sur ces éléments et pas uniquement sur les coûts de l'énergie et du capital.

L'inclusion partielle d'options de réduction est plus difficile à corriger car les modèles ne sont pas tous capables de décrire l'ensemble des activités émettrices. Des efforts de modélisation sont en cours pour améliorer la représentation des gaz autres que le CO_2 et des puits de carbone dans les modèles économiques globaux, mais tous ne sont pas à même d'intégrer les deux types de mesure de la même manière.

Les différences de date de démarrage des modèles sont importantes pour estimer les coûts à court terme. Ainsi, les coûts pour atteindre les objectifs du protocole de Kyoto sont plus élevés si le modèle suppose que les mesures de réduction n'entrent en vigueur qu'aujourd'hui et pas en 1990.

Faut-il inclure ou non les mesures à coût négatif dans un scénario de référence ? Cette question est souvent laissée à l'appréciation des modélisateurs. Inclure ces mesures reviendrait d'une part à ignorer le fait que celles-ci ne pénètrent pas le marché aujourd'hui et d'autre part à supposer que, pour une raison imprévue, ces échecs du marché seront surmontés sans intervention politique. Une recherche serait nécessaire pour estimer le rythme d'adoption des mesures rentables sans intervention publique.

Estimer les coûts en présence de marché de quotas d'émissions

Les échanges de droits d'émission de carbone doivent permettre d'effectuer les réductions d'émissions là où elles sont les moins chères. Le protocole de Kyoto offre trois mécanismes à cet effet : la mise en œuvre conjointe et le mécanisme de développement propre, pour les réductions liées à des projets concrets localisés géographiquement, et le marché de permis d'émission pour des échanges entre pays industrialisés. Les modèles économiques ne tiennent pas compte des coûts afférents aux échanges et des coûts générés par une éventuelle restriction de ceux-ci. Bien que cela n'ait pas été quantifié, on pense intuitivement que les coûts de transaction des permis d'émission sont plus faibles que ceux des mécanismes de type projet. Les premiers peuvent

être définis comme la différence entre le prix de l'offre et de la demande de carbone dans un marché d'échange d'émissions. Quel est ce prix ? Comment change-t-il avec le temps et la maturation du marché ? Est-il différent sur le marché intérieur et sur le marché international ? La réponse à ces questions est nécessaire pour exprimer correctement les coûts dans les modèles.

Les coûts de transaction des mécanismes de type projet sont plus élevés : tout projet soumis doit être soigneusement comparé à un scénario de référence, virtuel, sans ce projet. Ces coûts comprennent d'une part les coûts directement liés à l'obtention de bénéfices en termes de réduction des émissions de gaz à effet de serre générés par le projet — qui incluent les coûts d'estimation des scénarios de référence, de suivi et d'évaluation des émissions du projet, de leur vérification et de la certification des crédits de réduction — ; d'autre part, les coûts additionnels associés à la conception du projet et aux études de faisabilité. Malheureusement les modèles actuels manquent de données pour prendre ces coûts en compte.

Les barrières à la pénétration des technologies

Il existe deux catégories de barrière à la pénétration des technologies (chapitre 5 du rapport) : celles que les économistes considèrent comme des échecs de marché pour des préférences des consommateurs données et celles nécessitant des changements de ces préférences, que les technologues peuvent considérer comme des barrières supplémentaires. Les premières comprennent, par exemple, le manque d'information, les prix subventionnés et les incitations trop dispersées qui dissuadent les agents de poursuivre des améliorations d'efficacité énergétique et les secondes, les changements dans les habitudes, les normes culturelles, etc. De nombreux articles ont été écrits sur le rôle de ces barrières.

Souvent, les estimations de coûts ne tiennent pas compte de ces barrières. Dans la plupart des modèles économiques globaux, on suppose que les barrières actuelles disparaîtront à terme et que toutes les estimations de coûts négatifs seront absorbées dans le scénario de référence. Dans les modèles technologiques, les estimations de coûts ignorent l'existence de barrières et tendent à donner une vision optimiste des coûts et du potentiel de pénétration des technologies. On pourrait donc quantifier l'impact des barrières sur ces dernières estimations en identifiant l'élément qui serait perturbé par celles-ci. Ainsi, la rareté en capital s'accompagne d'un coût élevé de l'emprunt ; elle justifie donc l'utilisation d'un taux d'actualisation plus élevé que celui généralement utilisé dans un modèle technologique. Un marché éloigné pour des produits forestiers peut entraîner des coûts de transport élevés et augmenter les coûts d'un projet forestier. L'absence de droits de propriété peut impliquer un changement plus lent de l'exploitation des terres et donc un potentiel de séquestration sur une période de temps plus longue que celle envisagée par le modélisateur.

La quantification des barrières et leur impact est peut-être la recherche primordiale à effectuer pour réduire l'écart entre les deux types d'estimation des coût des mesures de réduction.

Entre « pire des cas » et illusoire gratuité. Quelques ordres de grandeur

Frédéric Ghersi, Jean-Charles Hourcade

Frédéric Ghersi est chargé de recherche au CNRS. Il travaille sur la modélisation en équilibre général des politiques climatiques, en insistant sur les modalités de recyclage des rentes générées. Il articule la prospective macroéconomique et la prospective du secteur de l'énergie.

Jean-Charles Hourcade est directeur de recherche au CNRS et directeur d'étude à l'EHESS. Depuis 1987, il est directeur du Centre international de recherche sur l'environnement et le développement (Cired). Il a contribué, en tant qu'auteur principal, au deuxième et au troisième rapport du GIEC (groupe 3).

Si à partir de l'hypothèse du « pire des cas », on mobilise la totalité des variables de baisse des coûts de Kyoto (potentiels à coût négatif, marché mondial du carbone incluant les pays en développement et sans pouvoir oligopolistique de la Russie et de l'Ukraine), cela conduit à un prix du carbone de 32 $/tC avec un espace de vraisemblance de 4 $/tC à 59 $/tC. En outre, faire l'hypothèse de permis aux enchères recyclés systématiquement dans des baisses d'impôt sur le secteur productif, mobiliser la séquestration envisagée lors du « compromis manqué » de la sixième Conférence des parties à la Convention sur les changements climatiques de La Haye conduiraient à un coût net nul voire à un bénéfice.

Mais un tel résultat repose sur un ensemble d'hypothèses aussi peu crédibles que celles du « pire des cas ». Pour donner une idée plus réaliste des résultats qu'on peut attendre de politiques bien conçues et tenant compte de contraintes réelles de mise en place, on peut chiffrer le scénario suivant, qui reprend les chiffres du GIEC traités par le logiciel SAP 12 développé au Cired par les auteurs* :

– mobilisation de 20 % des potentiels technologiques « sans regret » ;

– puits de carbone selon les accords de Marrakech et, pour les Etats-Unis, ceux du « compromis manqué » de La Haye soit 169 MtC pour une moyenne de 817 MtC de réduction exigées (espace de vraisemblance de 745 à 889 MtC) ;

– Russie et Ukraine vendant seulement deux tiers de leurs quotas excédentaires de façon à maximiser leur rente ;

– prise en compte de coûts de transaction réduisant de 85 % les potentiels de réduction de coût à travers le mécanisme de développement propre, ce qui correspond à l'évaluation retenue par la synthèse publiée par Weyant (1999).

Sous ces hypothèses, notre modèle indique un prix du carbone de 28 $/tC, au centre d'un espace de vraisemblance (un écart-type de part et d'autre de la moyenne des simulations des douze modèles réduits réunis dans ce travail) de 13 à 42 $/tC soit, traduit en hausse du prix des carburants, un surcoût de 0,01 à 0,03 € par litre, correspondant à un coût réel très faible pour les ménages (0,018 % pour l'Europe, 0,027 % pour les Etats-Unis en termes d'impact sur la croissance). Ce prix de 28 $ est inférieur à celui donné précédemment (32 $/tC) en raison de la réévaluation des tendances réelles d'émissions qui impliquent un surplus de quotas venant des pays de l'ex-bloc soviétique beaucoup plus important mais également beaucoup moins d'efforts pour l'Europe.

Si on étend l'analyse pour prendre en compte la réévaluation des tendances réelles d'émission (les chiffres actuels suggèrent qu'elles ont été substantiellement surestimées dans les études rapportées par le

* Hourcade et Ghersi, 2002.

GIEC pour l'Europe et la Russie), on débouche sur un prix moyen de 20 $ seulement. En ajoutant à cet effet baissier les effets des bénéfices secondaires et des réaménagements de la fiscalité, le coût pour le consommateur d'énergie serait réel mais encore plus modéré et le coût net pour les ménages voisin de zéro.

Références bibliographiques

Agrawala S., 1998. Structural and Process History of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Climatic Change, 39(4), pp. 621-642.

Agrawala S., 1999. Science Advisory Mechanisms in Multilateral Decision-making: Three Models from the Climate Change Regime. Ph.D. Dissertation, Princeton University, 403 p., Princeton, N.J.

Ambrosi P., J.-C. Hourcade & H. Le Treut, 2002. Spatialisation des dommages et incertitude : primes de risque régionales et agrégation. *In* Modélisation intégrée, évaluation des risques climatiques et des politiques de précaution. Progamme GICC (Mate/MIES/Ademe), Rapport final, J.-C. Hourcade et H. Le Treut (dir.).

Cox P.M., R.A. Betts, C.D. Jones, S.A. Spall & I.J. Totterdell, 2000. Acceleration of global warming due to carbon cycle feedbacks in a coupled climate model. Nature, 408, pp. 184-187.

Deneux M., 2002. L'évaluation de l'ampleur des changements climatiques, de leurs causes et de leur impact prévisible sur la géographie de la France à l'horizon 2025, 2050 et 2100. Rapport n° 3603 (Ass. nationale), n° 224 (Sénat), Office parlementaire d'évaluation des choix scientifiques et technologiques (Assemblée nationale, Sénat), Paris.

Dickinson R.E. & R.J. Cicerone, 1986. Future global warming from atmospheric trace gases. Nature, 319, pp. 109-115.

Dron D., 2003. De la recherche à la décision, enjeux de la construction d'une représentation des risques climatiques. Résumé de l'intervention au séminaire « Evaluer les risques climatiques : enjeux pour la décision, enjeux pour la recherche », 12 novembre. Iddri, IPSL, Cired, ENS. www.iddri.org/iddri/telecharge/climat/risques_climatiques/dron_12-11_resum.pdf

Dufresne J.-L., P. Friedlingstein, M. Berthelot, L. Bopp, P. Ciais, L. Fairhead, H. Le Treut & P. Monfray, 2002. On the magnitude of positive feedback between future climate change and the carbon cycle. Geophys. Res. Let., 29(10), 10.1029/2001GL013777, pp. 184-187.

FAO, 2002. FAOSTAT, FAO, Rome.

Fankhauser S., 1994. The economic costs of climate change: a survey. Global Environmental Change 4 (4), pp. 301-309.

Friedlingstein P., J.-L. Dufresne P.M. Cox & P. Rayner, 2003. How positive is the feedback between climate change and the carbon cycle. Tellus, 55B, pp. 692-700.

Ghil M. & H. Le Treut, 1999. Climate variability and climate change. *In* Scientific Bridges for 2000 and Beyond, a Virtual Colloquium by the Elf-Aquitaine Professors of the Académie des Sciences. Rapports de l'Académie des Sciences, TEC&DOC, London-Paris-New York, pp. 105-109.

Ghil M., 2002a. Natural climate variability. *In* Encyclopedia of Global Environmental Change, T. Munn (Ed.), Vol. 1, J. Wiley & Sons, Chichester-New York, pp. 544-549.

Ghil M., 2002b. Climate variability: Nonlinear aspects. *In* Encyclopedia of Atmospheric Sciences. J.R. Holton, J. Pyle & J.A. Curry (Eds.), Academic Press, pp. 432-438.

GIEC, 2002a. Résumé technique.

GIEC, 2002b. Résumé à l'intention des décideurs.

Hourcade J.-C. & F. Ghersi, 2002. The Economics of a Lost Deal: Kyoto-The Hague-Marrakesh. The Energy Journal, 23(3), pp. 1-26.

IPCC, 2000. Special Report on Emission Scenarios.

IPCC, 2001a. Adaptation to Climate Change in the Context of Sustainable Development and Equity (Chapter 18). *In* Climate Change 2001: Impacts, Adaptation and Vulnerability, Cambridge University Press.

IPCC, 2001b. Summary for Policy Makers. *In* Climate Change 2001: Impacts, Adaptation and Vulnerability, Cambridge University Press.

Kates R.W., 1997. Report on reports: Climate Change 1995—Impacts, Adaptation, and Mitigation. Environment, 39(9), pp. 29-33.

Klein R.J.T., 1998. Towards better understanding, assessment and funding of climate adaptation. Change, 44.

Locatelli B. & C. Loisel, 2002. Changement climatique : la vérité est-elle au fond du puits ? Natures, Sciences et Sociétés, n° 4, Vol. 10, pp. 7-19.

Lomborg B., 2001. The skeptical environmentalist. Cambridge University Press, 496 p.

Marquet D., 2001. Colère. Albin Michel.

Mendelsohn R., W. Morrison, M.E. Schlesinger & N.G. Andronova, 1997. Country-Specific Market Impacts. Climatic Change, 45, pp. 553-569.

Nordhaus W., 1994. Expert opinion on climatic change. American Scientist, 82, pp. 45-52.

Pachauri R., 2003. IPCC's Role in Climate Change and Sustainable Development. Tata Energy Research Institute, New Delhi, www.teri.res.in/ teriin/events/docs/ipcc/rkp.pdf. Accessed February 19, 2004.

Pittock A.B., 2002. What we know and don't know about climate change: Reflections on the IPCC TAR. Climatic Change 53 (4), June, pp. 393-411.

Roughgarden T. & S.H. Schneider, 1999. Climate change policy: quantifying uncertainties for damages and optimal control taxes. Energy Policy, 27, pp. 415-429.

Simonett O., 1989. Potential impacts of global warming: cases studies on climatic change. GRID-Geneva.

Smit B. & O. Pilifosova, 2003. From Adaptation to Adaptive Capacity and Vulnerability Reduction. *In* J.B. Smith, R.J.T. Klein & S. Huq (eds.), Climate Change, Adaptive Capacity and Development. Imperial College Press, pp. 9-28.

Weber J., 2002. Risque et pauvreté : comment penser un monde sans assurances. Risques, n° 51, juillet-septembre, pp. 100-104.

Weller G. & 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 (AK).

Weyant J.-P. (ed.), 1999. The Costs of the Kyoto Protocol: a Multi-Model Evaluation. The Energy Journal, Special Issue.

World Bank, 2001. World Development Indicators database, april 2001—Statistical Index, 2001. World Development Indicators. Washington D.C.

Les publications de l'Iddri

Les notes

Créer une organisation mondiale de l'environnement ? Eléments pour le débat. Frank Biermann, Etienne Rolland-Piègue, Konrad von Moltke. Les notes de l'Iddri, n° 5, Iddri, 2003, 36 p.

La mise en œuvre du droit international de l'environnement. Sandrine Maljean-Dubois. Les notes de l'Iddri, n° 4, Iddri, 2003, 64 p.

L'expertise dans les champs du principe de précaution. Propositions, recommandations et commentaires. Claire Weill. Les notes de l'Iddri, n° 3, Iddri, 2003, 44 p.

Eau : encadrer les partenariats public-privé. Thierry Giordano (coord.). Les notes de l'Iddri, n° 2, Iddri, 2003, 44 p.

Pourquoi faut-il aller à Johannesburg ? Iddri. Les notes de l'Iddri, n °1, Iddri, 2002, 28 p.

Les synthèses

International Governance of Biodiversity: Involving all the users of genetic resources. Sélim Louafi, Jean-Frédéric Morin. Les synthèses de l'Iddri, n° 5, Iddri, 2004, 4 p.

Gouvernance internationale de la biodiversité : impliquer tous les utilisateurs de ressources génétiques. Sélim Louafi, Jean-Frédéric Morin. Les synthèses de l'Iddri, n° 4, Iddri, 2004, 4 p.

The CBD: Local knowledge systems at the heart of international debates. Bernard Roussel. Les synthèses de l'Iddri, n° 3, Iddri, 2003. 4 p.

La Convention sur la diversité biologique : les savoirs locaux au cœur des débats internationaux. Bernard Roussel. Les synthèses de l'Iddri, n° 2, Iddri, 2003, 4 p.

Quel avenir pour la fiscalité mondiale ? Thierry Giordano. Les synthèses de l'Iddri, n° 1, Iddri, 2003, 4 p.

Les rapports

Analyse comparative des politiques forestières tropicales en Europe – Allemagne, Finlande et Royaume-Uni. Benjamin Singer. Les rapports de l'Iddri, n° 5, 31 p.

Fiscalité internationale et financement du développement durable. Thierry Giordano. Les rapports de l'Iddri, n° 4, 30 p.

La Convention sur la diversité biologique à la croisée de quatre discours. Nicolas Brahy et Sélim Louafi. Les rapports de l'Iddri, n° 3, Iddri, 2004, 32 p.

L'OMC et les services publics. Hélène Ruiz Fabri et Jean-Philippe Crontiras. Les rapports de l'Iddri, n° 2. Iddri, 2003. 64 p.

Stratégies et plans d'action sur la biodiversité – Finlande, Portugal, Royaume-Uni, Canada. Stéphane Guéneau et Anne Chetaille. Les rapports de l'Iddri, n° 1, Iddri, 2003, 35 p.

Les séminaires

L'essence du principe de précaution : la science incertaine mais néanmoins fiable. Claude Henry et Marc Henry. Les séminaires de l'Iddri, n° 11, Iddri, 2003, 18 p.

Droits de propriété et gestion efficace des ressources naturelles. Jean-Philippe Platteau. Les séminaires de l'Iddri, n° 10, Iddri, 2003, 40 p.

Privatization, trade policy and the question of water. Scott Vaughan. Les séminaires de l'Iddri, n° 9, Iddri, 2003, 40 p.

Ecotaxes : quels enseignements ? Stephen Smith, Emmanuel Caicedo, Annabelle Berger. Les séminaires de l'Iddri, n° 8, Iddri, 2003. 48 p.

Crises et précaution. Olivier Godard et Patrick Lagadec. Les séminaires de l'Iddri, n° 7, Iddri, 2003. 48 p.

Confronting industry-distributional concerns in US climate-change policy. Alan Bovenberg et Lawrence Goulder. Les séminaires de l'Iddri, n° 6, Iddri, 2003, 48 p.

Improving cost-effectiveness and facilitating participation of developing countries in international emissions trading. Peter Bohm. Les séminaires de lddri, n° 5, Iddri, 2003, 32 p.

Assurance des catastrophes naturelles : faut-il choisir entre prévention et solidarité ? Laure Latruffe et Pierre Picard. Les séminaires de l'Iddri, n° 4, Iddri, 2002, 44 p.

How valuable are the tropical forests? David Pearce. Les séminaires de l'Iddri, n° 3, Iddri, 2002, 44 p.

Matching institutions and ecosystems: The problem of Fit. Oran Young. Les séminaires de l'Iddri, n° 2, Iddri, 2002, 31 p.

Pour une protection efficace et équitable de la biodiversité. Charles Perrings et Madhav Gadgil. Les séminaires de l'Iddri, n° 1, Iddri, 2002, 46 p.

Les actes

European Precautionary Practice. Les pratiques européennes de précaution. Konrad von Moltke et Claire Weill (éditeurs). Les actes de l'Iddri, n° 1, Iddri, 2004, 64 p.

Les documents de travail

Taking into Account knowledge and know-how about Nature: The French experiences. Elisabeth Chouvin, Sélim Louafi, Bernard Roussel. Les documents de travail de l'Iddri, n° 2, Iddri, 2004, 28 p.

Prendre en compte les savoirs et savoir-faire locaux sur la nature. Les expériences françaises. Elisabeth Chouvin, Sélim Louafi, Bernard Roussel. Les documents de travail de l'Iddri, n° 1, Iddri, 2004, 28 p.

Photo de couverture
Yann Arthus-Bertrand
Icebergs et manchots.
Adélie, terre Adélie, Antarctique (pôle Sud) (66°00' S – 141°00' E).

L'Antarctique s'étend sur 16,5 millions de km² (trente fois la France), que prolongent sur la mer 1,5 million de km² de glaciers. Le sixième continent est un point d'observation unique des phénomènes atmosphériques et climatiques car ses glaces, en emprisonnant l'air lors de leur formation, ont retenu des millions d'années d'histoire du climat de la Terre. Phénomène naturel probablement aggravé par le réchauffement planétaire, les banquises polaires ont tendance à fondre. L'épaisseur moyenne de la banquise arctique est passée de 3,12 m dans les années 1960 à 1,8 m dans les années 1990. Le danger touche aussi les écosystèmes montagneux, victimes directes des hausses de température. La fonte des glaciers – le Kilimandjaro a perdu 55 % de ses glaciers en quarante ans – menace de nombreuses zones habitées. En 1970, au Pérou, des chutes de séracs et de rochers détachés du glacier du Huascarane ont fait au moins 15 000 morts. Si les tendances actuelles se confirment, un grand nombre de glaciers de montagne, y compris ceux du parc national des Glaciers aux Etats-Unis, auront entièrement disparu avant cent ans.

LA TERRE VUE DU CIEL
UN PORTRAIT AÉRIEN DE NOTRE PLANÈTE

Depuis 1990, Yann Arthus-Bertrand a survolé une centaine de pays. Ses photographies aériennes, indissociables des textes qui les accompagnent, invitent chacun à réfléchir à l'évolution de la Terre et au devenir de ses habitants. Un constat en images et en mots pour prendre conscience que nous sommes tous individuellement responsables de notre planète, et décider ensemble de ce que nous léguerons aux générations futures.
Site web : www.yannarthusbertrand.org
Le livre *La Terre vue du ciel* est paru aux Editions de La Martinière.

La communauté scientifique internationale, réunie dans le cadre du Groupe intergouvernemental d'experts sur l'évolution du climat (GIEC), confirme l'influence des activités humaines sur le climat. Elle s'accorde sur l'augmentation de la température moyenne du globe durant ce siècle. Cependant, ce diagnostic est parfois remis en cause dans les médias.

Que faut-il en penser ? Cet ouvrage livre une lecture des derniers travaux du GIEC par des scientifiques de haut niveau ayant contribué à leur élaboration.

iDDRI
institut du développement durable et des relations internationales

Prix : 80 euros

ISBN 2-915819-00-9
EAN 9782915819007