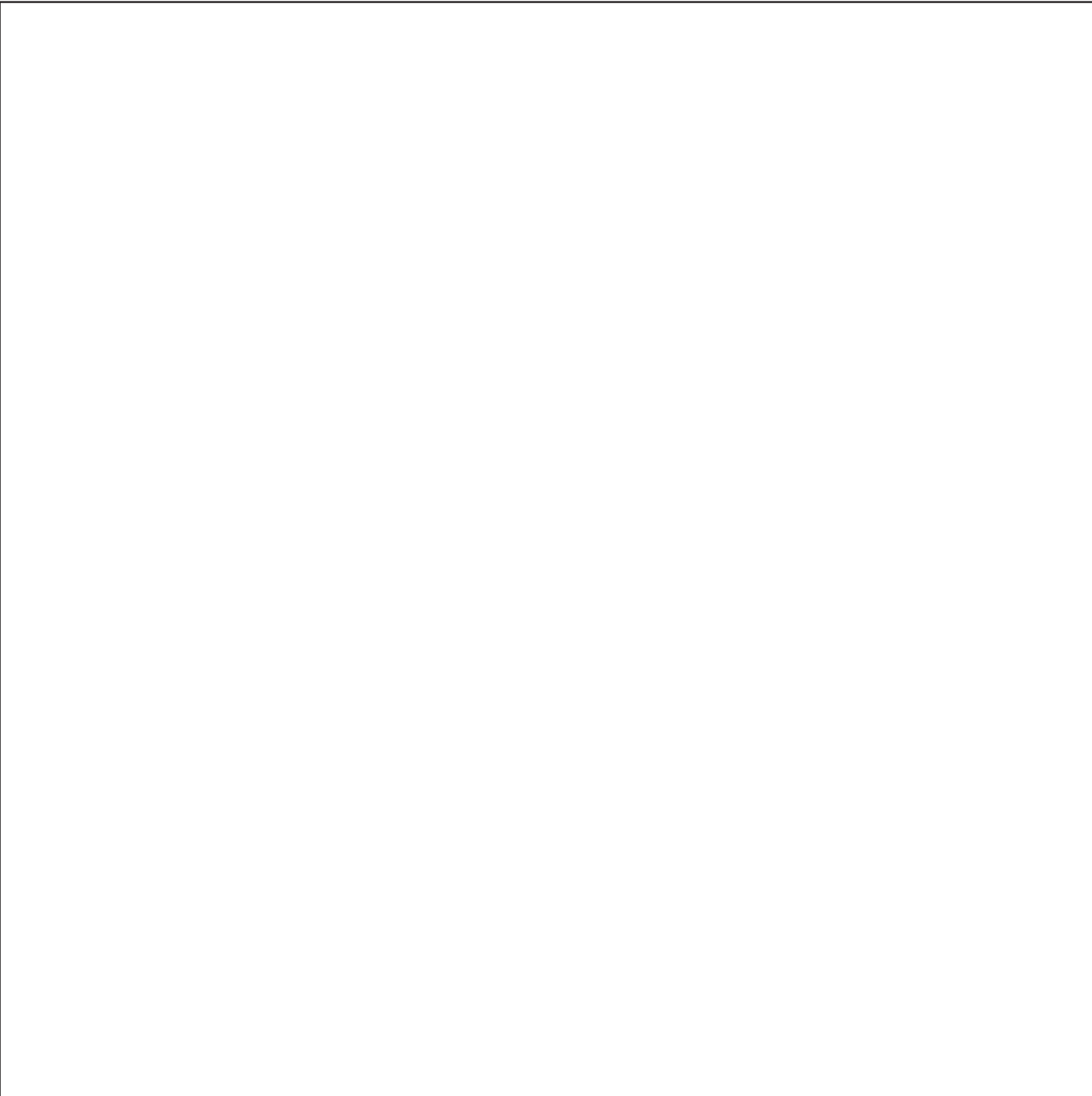


impacts

CHANGEMENTS CLIMATIQUES : QUELS IMPACTS EN FRANCE ?

GREENPEACE



AVANT-PROPOS

Les changements climatiques, induits par l'utilisation massive des combustibles fossiles, sont sans conteste le péril environnemental le plus grave auquel l'humanité ait jamais été confrontée. Pour empêcher les « changements climatiques dangereux » (objectif ultime de la Convention Cadre des Nations Unies), il faut maintenir le réchauffement de notre planète en-deçà de 2°C par rapport aux niveaux de température pré-industriels. Ainsi, la communauté internationale doit relever un défi considérable : ramener, d'ici 2020, les émissions mondiales de gaz à effet de serre à leurs niveaux de 1990, pour les réduire ensuite de moitié d'ici 2050. D'un point de vue moral, légal et pratique, c'est aux pays industrialisés qu'incombe la responsabilité de mener cette lutte contre le réchauffement climatique en réduisant d'un facteur 4 leurs émissions polluantes d'ici le milieu de ce siècle. De tels objectifs seront au cœur des négociations internationales préparatoires à la seconde phase du Protocole de Kyoto qui doivent démarrer à la COP/MOP1 de Montréal dans les prochaines semaines.

La part de responsabilité humaine et la réalité du réchauffement global sont désormais reprises largement dans les discours politiques et diffusées par les médias. Néanmoins, les décideurs feignent encore d'ignorer qu'il est urgent d'agir car nous ne disposons que de peu de temps pour contenir l'ampleur d'un phénomène déjà amorcé. Pour preuve, les politiques et mesures récemment adoptées (Plan Climat 2004 et Plan National Allocation Quotas) ne sont pas à la hauteur des enjeux et n'ouvrent pas encore la voie vers une société sobre en carbone. La France et l'Union Européenne auraient pourtant tout à gagner en termes d'indépendance énergétique, d'emplois et d'activité économique durable à se positionner à l'avant-garde des technologies d'efficacité énergétique et d'énergies renouvelables.

Bien que les impacts des bouleversements climatiques touchent déjà et toucheront de manière disproportionnée les populations pauvres des pays en développement, les pays développés ne

seront pas épargnés. La tragédie humanitaire consécutive à l'Ouragan Katrina, sur le territoire même de la première puissance mondiale, atteste de la vulnérabilité des populations, des infrastructures et de l'industrie, aux extrêmes météorologiques qui pourraient devenir plus fréquents et plus intenses dans les prochaines décennies. La canicule de 2003 a certes accéléré la prise de conscience collective du problème du réchauffement climatique, mais combien d'entre nous appréhendent aujourd'hui de manière exhaustive l'étendue des impacts prévus dans notre pays ?

Mobiliser les citoyens et pousser les décideurs à prendre des mesures courageuses dès aujourd'hui pour prévenir une catastrophe future est difficile tant que les effets locaux du réchauffement global demeurent incertains et mal connus. Greenpeace a donc jugé opportun de solliciter les meilleurs experts français et internationaux afin de faire le point des connaissances sur les menaces climatiques qui pèsent sur notre pays. Je les remercie très sincèrement de l'intérêt qu'ils ont témoigné pour cette démarche.

Si la lutte contre les changements climatiques a un coût, le prix de l'inaction est assurément bien plus élevé : telle est l'information que ce rapport porte à la réflexion de chacun...



PASCAL HUSTING
Directeur Général Greenpeace France

PREFACE

Chaque fois que nous devons décrire les modifications climatiques que vont provoquer les activités humaines, dans le cadre de conférences ou d'interventions dans les médias, nous insistons sur l'impact considérable d'un réchauffement moyen de 3°C, que les modèles permettent d'envisager avant la fin de ce siècle, et qui se traduira par un climat très différent de celui dont nous bénéficions actuellement. La succession dans le passé de périodes glaciaires et interglaciaires, dont les modifications astronomiques du mouvement de la Terre sont à l'origine, offre des références essentielles à cet égard ; il y a 20000 ans, au dernier maximum glaciaire, la température moyenne de notre Planète n'était plus froide que d'environ 5°C, alors que l'Europe et l'Amérique du Nord étaient couvertes de glaciers, dont la fonte s'est étalée sur des milliers d'années....

Et nous mentionnons immédiatement que nous ne sommes pas égaux face à ce réchauffement. Les modèles analysés par le dernier rapport du GIEC, le Groupe Intergouvernemental d'Experts sur l'Évolution du Climat, montrent que ce réchauffement moyen de 3°C risque d'être amplifié d'un facteur trois dans les régions de l'Arctique et de près de 50% en Europe de l'Ouest. La carte du réchauffement présentée dans le chapitre d'introduction de cet ouvrage est extrêmement parlante à cet égard. La carte du réchauffement présentée au chapitre détaillant les changements climatiques futurs globaux est extrêmement parlante à cet égard.

Malgré cela, les spécialistes de la modélisation de l'évolution future de notre climat, ont longtemps marqué une certaine réticence à faire état de prédictions à l'échelle régionale, parce qu'elles sont tributaires d'incertitudes variées. Celles-ci se font sentir au niveau global : l'ampleur prévisible du réchauffement climatique moyen à

l'horizon 2100, se situe dans une fourchette qui va d'un peu moins de 2 à près de 6 °C, d'après ce même rapport du GIEC. Cette fourchette importante est pour moitié environ liée au comportement de nos sociétés - le réchauffement sera d'autant plus marqué que l'effet de serre augmente, et inversement - mais l'autre partie résulte, elle, de la difficulté de prendre correctement en compte dans les modèles tout un ensemble de rétroactions internes au système climatique. La prudence de la communauté est donc justifiée d'autant que les incertitudes sont tout aussi importantes, voire plus, lorsque l'on s'intéresse aux caractéristiques régionales de l'évolution des précipitations ou des phénomènes extrêmes, ou encore à la possibilité de surprises climatiques.

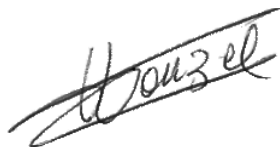
A l'inverse, la demande de prédictions régionales, si possible de plus en plus précises, est extrêmement forte du côté des décideurs politiques naturellement enclins à s'intéresser aux échelles nationale, voire régionale ou locale, et des grands acteurs économiques. De façon évidente, elle l'est également de la part de la communauté scientifique qui cherche à étudier les impacts des changements climatiques mais aussi de ceux qui s'intéressent aux mesures à mettre en œuvre - les actions envisagées pour maîtriser les émissions des gaz à effet de serre ayant des répercussions à toutes les échelles, du global au local - et aux aspects sociétaux incluant les stratégies d'adaptation face au réchauffement climatique.

Même si elle est bien consciente des limites inhérentes à une approche régionale du changement climatique, notre communauté scientifique, est très sensible à cette demande. Elle a mis en place une stratégie dédiée, où la notion de « scénarios » (la description cohérente de certaines évolutions futures possibles) remplace la

notion de « prévision » au sens le plus habituel. La sensibilité aux enjeux de cette démarche explique l'enthousiasme avec lequel les chercheurs contactés, en France et à l'étranger, ont répondu à la sollicitation de Greenpeace. Cet enthousiasme se traduit par un ensemble d'articles de grande qualité qui nous permet déjà de mieux cerner comment notre pays risque d'être affecté par le réchauffement climatique lié aux activités humaines. Au nom de cette communauté, nous remercions Greenpeace d'avoir pris cette initiative qui devrait contribuer à une meilleure prise de conscience des risques climatiques et de l'urgence de la mise en oeuvre de mesures visant à la maîtrise de l'effet de serre.



Hervé Le Treut



Jean Jouzel

Jean Jouzel est directeur de recherches au CEA, et directeur de l'Institut Pierre Simon Laplace de l'Environnement Global (IPSL)

Hervé Le Treut est directeur du Laboratoire de Météorologie Dynamique (LMD) de l'PSL. L'un et l'autre sont impliqués dans la rédaction du 4ème rapport du GIEC à paraître en 2007.

INTRODUCTION GENERALE/ CONTEXTE DU RAPPORT

L'ambition de ce rapport est de présenter une revue de l'état des connaissances sur les conséquences du réchauffement global en France en termes de changements climatiques et d'impacts.

Ce rapport est à l'initiative de Greenpeace France, qui nous en a confié la réalisation avec une totale liberté éditoriale sur le choix des thèmes et des auteurs. Forts du soutien de Jean Jouzel et d'Hervé Le Treut de l'Institut Pierre Simon Laplace, nous avons sollicité les spécialistes qui, par leur expérience, ont toute légitimité d'écrire sur les thématiques présentées. Nous avons ainsi fait appel à des experts reconnus qui ont pour la plupart déjà contribué à des rapports de référence nationaux, tel que le Rapport au Sénat ou les rapports de la Mission Interministérielle de l'Effet de Serre, et internationaux, tel que ceux du GIEC, afin de garantir une communication scientifique consensuelle et de qualité vers le public.

Ce rapport constitue une excellente opportunité de faire le point des connaissances sans redondances avec des travaux récents ou en cours. La principale contrainte étant le temps imparti, certaines thématiques font défaut. En effet, il a été réalisé entre juillet et octobre 2005, alors que plusieurs de ces auteurs finalisaient leur contribution au prochain rapport du GIEC à paraître en 2007. Je tiens sincèrement à remercier l'ensemble des auteurs d'avoir accepté d'y contribuer, non seulement parce qu'ils ont dû travailler dans des délais très courts, mais surtout parce qu'ils ont répondu au besoin d'information de la société civile au travers de l'appel d'une ONG sur une thématique aussi sensible et capitale en termes de choix de société.

Pour deux des trois thématiques de portée globale nous avons pris le parti de faire appel à des auteurs extra-européens. Notamment, il nous a semblé juste que l'un d'eux appartienne à un organisme de recherche des Etats-Unis, car ce pays fournit une contribution

considérable à la recherche sur le climat et le réchauffement global (quasiment la moitié des auteurs du GIEC en sont issus), se trouvant ainsi souvent en porte à faux avec les positions de son gouvernement.

La prise de conscience quant à la nécessité de réduire les émissions de gaz à effet de serre a abouti à des accords et engagements internationaux, dont celui de l'Union Européenne. Son objectif affiché est dorénavant d'agir pour maintenir le Réchauffement Global en dessous de 2°C par rapport au niveau pré-industriel (soit environ 3°C en Europe). Cette valeur est aujourd'hui présentée comme une valeur-seuil, au delà de laquelle le Réchauffement Global est qualifié de Dangereux pour l'humanité. Nous avons tenté de faire de cette valeur le fil conducteur de ce rapport et chaque section s'efforce, dans la mesure des connaissances actuelles, d'articuler ses résultats autour de cette valeur.

Ce rapport est constitué de deux parties. La première partie présente le contexte climatique actuel et futur sur la base de scénarios d'émissions de gaz à effet de serre. La seconde partie offre un éclairage sur les impacts attendus proprement dits.



Harilaos Loukos

Harilaos Loukos est le Président et Directeur scientifique de Climact. Il est également expert auprès de l'Union Européenne pour l'évaluation des projets européens de recherche sur le climat.



SOMMAIRE

Avant-propos

Préface

Sommaire

Introduction générale

Pascal Husting

Jean Jouzel et Hervé Le Treut

Harilaos Loukos

CHANGEMENTS CLIMATIQUES

1.1 Changements climatiques globaux observés

1.2 Changements climatiques observés en France

1.3 Scénarios d'émission de gaz à effet de serre

1.4 Changements climatiques futurs globaux

Encart : Résultats GIEC récents

1.5 Changements climatiques futurs en France

Kevin Trenberth

Jean-Marc Moisselin

Patrick Criqui

Hervé Le Treut

Serge Planton / Pascale Braconnot

Serge Planton

IMPACTS

2.1 Impacts globaux

2.2 Impacts sur la ressource en eau

2.3 Impacts sur la couverture neigeuse

2.4 Impacts sur les glaciers alpins

2.5 Impacts sur les forêts

2.6 Impacts sur l'agriculture

2.7 Impacts sur la santé

2.8 Impacts sur le tourisme

2.9 Impacts sur l'économie

Encart : Analogues climatiques

pour le climat futur des villes européennes

Barrie Pittock

Pierre Chevallier

Eric Martin

Christian Vincent

Denis Loustau / Jean-Luc Dupouey

Bernard Seguin

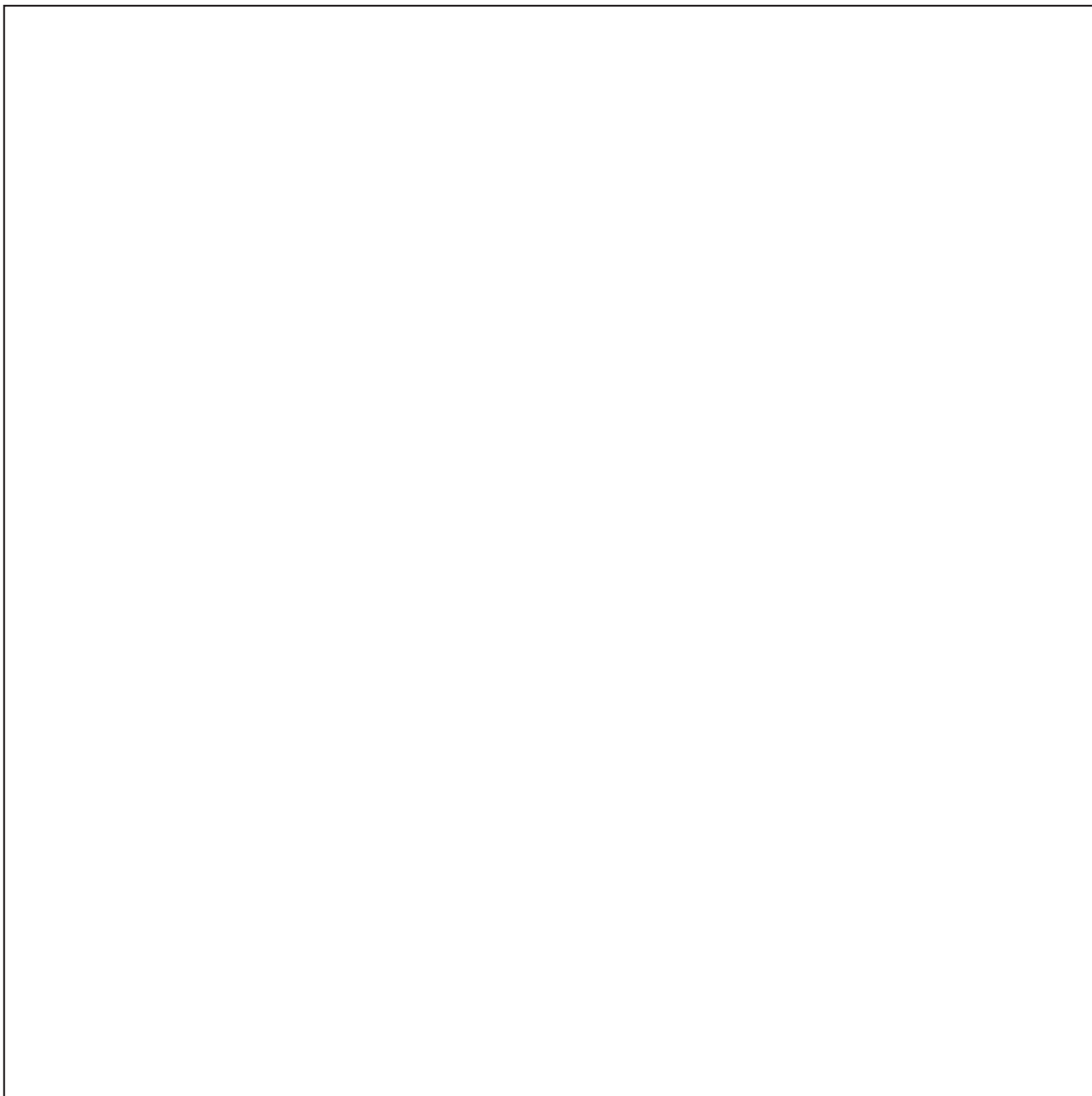
Jean-Pierre Besancenot

Jean Paul Céron, Ghislain Dubois

Jean Charles Hourcade

Stéphane Hallegatte

Liste des institutions



**changements
climatiques**

1.1 Changements climatiques globaux observés

Kevin E. Trenberth - National Center for Atmospheric Research

Kevin Trenberth est le Directeur de la Climate Analysis Section au National Center for Atmospheric Research (NCAR). Il est fortement impliqué au niveau national et international dans les études sur les changements climatiques. Il collabore au Joint Scientific Committee of the World Climate Research Programme et a collaboré en tant qu'auteur au rapport du GIEC. Il est membre de l'American Meteorological Society et de l'American Association for Advancement in Science, et membre honoraire de la Royal Society de Nouvelle Zélande. En 2000 il a reçu le prix Jule G. Charney de l'American Meteorological Society et a obtenu en 2003 le prix Distinguished Achievements Award du NCAR.

MESSAGES CLÉS

- Le réchauffement global est une réalité. La température globale de l'air en surface est de 0,75°C plus chaude qu'au début du 20ème siècle. Neuf des dix dernières années (1994-2004) sont parmi les années les plus chaudes que le globe ait connu au cours des 145 années d'enregistrements instrumentaux et, que l'hémisphère Nord ait connu au cours des 1000 dernières années.
- Les changements observés de la température de surface sont cohérents avec d'autres changements dans le sens du réchauffement, comme l'augmentation de la température de la surface de la mer, la réduction de la couverture neigeuse, le raccourcissement des saisons de gel, le retrait des glaciers et de la glace de mer, l'augmentation de la température des océans, l'élévation globale du niveau de la mer, et l'augmentation de la température et de la vapeur d'eau des couches supérieures de l'atmosphère. Des changements dans la circulation atmosphérique amplifient ces changements dans certaines régions ou les réduisent, parfois jusqu'à les contrer, dans d'autres.
- Les changements des valeurs moyennes s'accompagnent d'un changement amplifié des valeurs extrêmes. De nombreux indices le prouvent, comme l'augmentation des précipitations extrêmes.

pitations moyennes à fortes, même dans les régions où les précipitations sont en récession; l'augmentation en intensité et durée des sécheresses; la diminution du nombre de jours de gel; l'élévation des extrêmes de température journalière; la réduction du nombre de nuits froides; etc. La fréquence des tempêtes dans l'Atlantique Nord reste encore dans les seuils de variabilité naturelle mais on constate une intensité accrue d'ouragans et typhons (catégorie 4 et 5 notamment).

- La compréhension scientifique du climat montre désormais sans équivoques que le changement climatique lié au réchauffement global est déjà en cours. La capacité des modèles à simuler le climat passé et présent nous donne une confiance accrue dans leur capacité à simuler le futur.
- Les mesures d'atténuation des changements climatiques entreprises aujourd'hui n'auront d'effet que dans 50 ans. Elles diminueront l'ampleur et le rythme du changement cli-

matique futur, mais elles ne l'arrêteront probablement pas, car le rythme des changements projetés dépasse tout phénomène naturel constaté sur les 10 000 dernières années, et il est donc susceptible d'apporter une multitude de perturbations importantes. En conséquence, nous devons nous adapter aux changements climatiques en les planifiant et en améliorant les prévisions et leur déroulement probable. Le choix des actions à prendre ne dépend plus de la science mais de nos systèmes de valeurs. Il s'agit d'équité entre générations, d'équilibre entre pays en voie de développement et pays développés, de développement durable, de confiance dans les capacités d'adaptation de la technologie, et d'impacts sur l'économie et l'industrie. Dans la plupart des cas, il n'est pas tant question de ce qui est à faire mais de comment cela doit être fait en termes d'implémentation et de durée, puisque cela détermine le degré de perturbation des activités en cours.

INTRODUCTION

Cet article fournit une synthèse des changements climatiques globaux récemment observés, basée sur des mesures récentes et sur des analyses qui couvrent la période jusqu'à la mi-2005. Des informations plus détaillées sont fournies par le rapport du GIEC (2001) et par Karl and Trenberth (2003).

CHANGEMENTS OBSERVÉS

a) Température de surface

Le globe se réchauffe. Prétendre le contraire n'est pas crédible. Au cours des dernières années, la fiabilité des données de température de l'air de surface continentale et de tempéra-

re de surface de l'océan (TSO) (Jones and Moberg, 2003; Parker et al., 2004; Rayner et al., 2003; Smith and Reynolds, 2005) a augmenté, grâce à une couverture géographique plus étendue et à une disponibilité plus importante de données journalières. Les changements globaux de température enregistrés par la totalité des mesures instrumentales se caractérisent par une température relativement stable entre 1861-1920, un réchauffement d'environ 0,3°C jusqu'en 1950, un rafraîchissement d'environ 0,1°C jusqu'à la moitié des années '70 (seulement dans l'hémisphère Nord), et un réchauffement d'environ 0,55°C depuis. Le rythme d'augmentation de la température est donc plus important au

cours des dernières décennies et les températures globales actuelles sont d'environ $0,75^{\circ}\text{C}$ plus chaudes qu'au début du 20^{ème} siècle. Le réchauffement le plus important s'est produit sur les surfaces continentales, surtout pendant l'hiver boréal et au printemps sur les continents de l'hémisphère nord. De nombreuses études récentes indiquent que les effets de l'urbanisation et des modifications de l'usage des sols sur les températures moyennes des surfaces continentales –et hémisphériques– sont négligeables, parce que bien qu'elles prennent en compte des effets réels ceux-ci restent très locaux (Peterson and Owen, 2005).

Selon les mesures instrumentales des 145 dernières années, l'année la plus chaude reste 1998, car le réchauffement a été

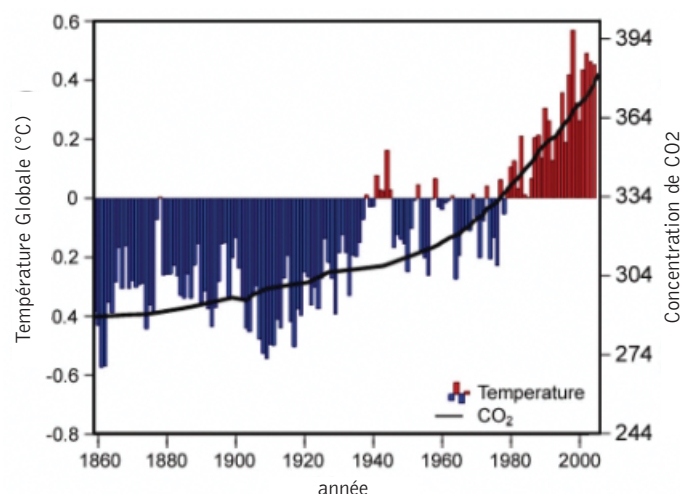


Figure 1. : Séries temporelles des anomalies de température globale en moyenne annuelle par référence à la moyenne de la période 1961-90 (barres, échelle de gauche), et la concentration atmosphérique moyenne annuelle de CO_2 (courbe noire, échelle de droite) les valeurs avant 1957 sont issues de mesures dans les bulles de glaces et celles après 1957 de mesures atmosphériques faites à Mauna Loa dans le Pacifique). Mis à jour à partir de Karl and Trenberth 2005.

Le globe se réchauffe. Prétendre le contraire n'est pas crédible.

amplifié par El Nino de 1997-98. Les années 2002-2004 sont respectivement les 2^{ème}, 3^{ème} et 4^{ème} années les plus chaudes depuis 1861, et sur les dix dernières années (1995 à 2004), neuf sont parmi les plus chaudes jamais enregistrées, à l'exception de 1996. Sur la base des reconstitutions de température fournies par des indicateurs indirects, comme les anneaux des arbres et les carottes de glace, plusieurs études ont également conclu que les températures de surface de l'hémisphère Nord sont plus chaudes qu'elles ne l'ont jamais été au cours des 1000 dernières années.

b) Cohérence avec d'autres changements observés

Sur les continents, une forte anti-corrélation est observée entre les précipitations et la température de surface pendant l'été et aux basses latitudes, tout au long de l'année. Les régions qui sont devenues plus humides, comme l'est des États-Unis, ne se sont pas autant réchauffées que les autres régions continentales (Trenberth and Shea, 2005). L'augmentation des précipitations est associée à l'augmentation de la couverture nuageuse et de l'humidité de surface, donc aussi à l'augmentation de l'évaporation (Walter et al., 2004). Le terme « obscurcissement global », utilisé par différents auteurs (Cohen et al., 2004), se réfère à une réduction généralisée du rayonnement solaire reçu par la surface de la Terre, au moins jusqu'aux années 1990 (Wild et al.,



2005). Même si les enregistrements ne couvrent qu'une faible partie du globe, l'évaluation de l'évaporation globale montre une diminution, à mettre en relation avec un fléchissement de la radiation de surface combinée avec une augmentation de nuages, des changements dans les propriétés des nuages, et une augmentation de la pollution de l'air en plusieurs régions entre 1970 et 1990 (Liepert, 2002). Il semblerait qu'une inversion de cette situation se soit produite dans les années récentes. L'augmentation de l'évaporation et la faible augmentation de la température qui en découle sont physiquement cohérentes avec une augmentation du flux de chaleur latente par rapport au flux de chaleur sensible, en provenance de la surface dans des conditions plus humides.

Le réchauffement décrit est cohérent avec un ensemble d'autres observations qui vont dans le sens d'un monde qui se réchauffe. Par exemple, on assiste à une réduction importante du nombre des jours de gel aux moyennes latitudes, plus à cause d'un avancement du dernier jour de gel au printemps, que d'un début tardif de la saison de gel en automne. Le nombre d'extrêmes journaliers de chaleur a augmenté, tandis que celui d'extrêmes de froid a diminué, surtout pendant la nuit.

La quantité de vapeur d'eau dans l'atmosphère a augmenté sur les océans de $1,3 \pm 0,3\%$ de 1988 à 2003, avec une structure spatiale et une amplitude cohérente avec les augmentations de TSO, et à humidité relative presque constante (Trenberth et al., 2005). On retrouve également une augmentation généralisée de vapeur d'eau à la surface. Les températures des océans ont aussi augmenté en profondeur, et les niveaux des eaux ont globalement augmenté de 15-20 cm au cours du 20ème siècle, avec un rythme accéléré sur la dernière décennie (3 cm) (Cazenave and Nerem, 2004; Lombard et al., 2005). Avec le réchauffement des océans, l'eau de mer se dilate et le niveau des eaux s'élève; la fonte des glaciers y contribue également.

On assiste à une réduction presque mondiale des glaciers, en masse et en étendue. Les surfaces glaciaires tropicales en Amérique du Sud, en Afrique et au Tibet ont décliné de façon remarquable au cours des décennies récentes (Thomson et al., 2003; Kaser et al., 2004). Si ce phénomène se poursuit, certains d'entre eux pourraient disparaître d'ici 30 ans. La couverture neigeuse a diminué sur plusieurs régions de l'hémisphère Nord, particulièrement au printemps, et le perma-

frost a également diminué. Les étendues de glace de mer ont reculé dans l'Arctique, particulièrement lors du printemps et de l'été. La température annuelle moyenne de l'Arctique (au nord de 65°N) a augmenté depuis les années 1960, et elle est à présent plus chaude (à l'échelle de la décennie) que pendant la période 1920-1945 (époque de réchauffement précédent). Dans l'Antarctique, la succession de réchauffement et refroidissement à l'échelle régionale est à mettre en relation avec la circulation atmosphérique. Le réchauffement de la Péninsule Antarctique depuis le début des années 1950 est l'un des signaux les plus évidents et cohérents observés dans le monde (Kwok and Comiso, 2002). Des réductions importantes de glace de mer se sont produites à l'ouest dans la mer de Bellinghausen, et sur le côté est de la Péninsule, des réductions de taille importantes se sont produites sur la plateforme glaciaire (« ice-shelf ») Larsen (Seambos et al., 2003). La circulation atmosphérique a également changé, et un écoulement zonal croissant est observé pratiquement en

On assiste à une réduction presque mondiale des glaciers, en masse et en étendue.

toute saison dans les deux hémisphères; les modes annulaires de moyenne et haute altitude se sont également renforcés. Dans l'hémisphère Nord, de l'air marin plus doux parvient en Europe en hiver depuis l'Atlantique Nord, ce qui en augmente le réchauffement (Hurrell et al., 2003). Dans l'hémisphère Sud, où le trou d'ozone a joué un rôle important, le résultat a été un refroidissement sur l'intérieur de l'Antarctique, mais

un réchauffement plus étendu sur la Péninsule Antarctique et en Patagonie, comme mentionné plus haut. D'une manière générale, les températures ont augmenté au-delà de la moyenne là où le flux s'est dirigé vers le pôle, et sont restées en deçà de la moyenne, où se sont refroidies là où le flux s'est dirigé vers l'équateur, ces effets traduisant des régimes de variabilité.

C) Température de la couche supérieure de l'atmosphère

Les ballons sondes qui mesurent la température et l'humidité des couches supérieures de l'atmosphère se situent uniquement sur des stations continentales et, puisqu'ils servent à suivre la météo, leur fiabilité pour les tendances climatiques est incertaine en raison des changements d'instruments au fil des ans. En effet, des travaux récents ont mis en évidence un certain nombre de changements dans les mesures des ballons sondes (Sherwood et al., 2005; Randel and Wu, 2005). Par exemple, les capteurs sont devenus plus petits et donc moins vulnérables au réchauffement solaire pendant la journée ; les résultats journaliers étaient clairement trop élevés dans les années précédentes (la comparaison avec les mesures nocturnes le prouve).

L'évaluation par télédétection satellite des températures des couches supérieures de l'atmosphère a donc été étudiée de près, notamment parce qu'elle fournit une vraie couverture globale depuis 1979. Cependant, des erreurs ont été détectées dans les mesures d'origine satellitaire des températures, associées à des changements d'orbite et à des glissements dans les temps des périodes d'analyse des mesures; des nouvelles analyses indiquent que la troposphère se réchauffe de façon similaire à la surface depuis 1979, date de début des

La sécheresse est aussi en train d'augmenter partout dans le monde depuis les années 1970(...)

mesures par satellite (Mears and Wents, 2005). En même temps, la stratosphère a subi un fort refroidissement depuis 1979, essentiellement à cause de la diminution observée de l'ozone stratosphérique.

Les mesures des changements de température de surface et des couches supérieures de l'atmosphère se recoupent désormais, et le comportement global du changement observé de température sur la verticale est cohérent avec celui qui est simulé par les modèles climatiques actuels (Santer et al., 2005). Les sceptiques du climat n'ont plus aucune base pour leurs revendications, qui étaient fondées sur un manque supposé de réchauffement dans les enregistrements satellites ou sur l'incohérence avec les résultats des modèles.

d. Extrêmes

Pour chaque changement dans le climat moyen, il est probable qu'un changement amplifié se produise dans les extrêmes (Meehl et al., 2000). La grande variabilité naturelle associée aux conditions météorologiques journalières, fait que nous ne percevons pas les petits changements climatiques, mais uniquement les changements de fréquence des événements extrêmes. Nous sommes adaptés à une gamme de variations naturelles du temps, mais ce sont les extrêmes du temps et du climat qui excèdent la tolérance.

L'indication principale du changement dans les extrêmes est

l'augmentation démontrée des précipitations (modérées à fortes) aux latitudes moyennes sur les 50 dernières années, même dans les régions où les cumuls annuels de précipitations sont en décroissance (Trenberth et al, 2003; Groisman et al., 2004, 2005). La sécheresse est aussi en train d'augmenter partout dans le monde depuis les années 1970, en raison aussi bien de la diminution récente des pluies sur les continents, que d'une plus forte évaporation liée à l'augmentation des températures (Dai et al, 2004). De plus, la tendan-



Le nombre d'ouragans dans l'Atlantique Nord a été supérieur à la normale pendant 9 des 11 dernières années(...)

ce observée de réduction de jours de gel est associée avec le réchauffement moyen dans la plupart des régions des latitudes moyennes. Les résultats pour les extrêmes journaliers liés à la température montrent aussi un nombre généralement augmenté de jours/nuits chauds (et un rallongement des vagues de chaleur) et une encore plus grande réduction du nombre de jours froids et surtout de nuits froides.

Les tendances en fréquence et intensité des tempêtes tropicales sont masquées par une forte variabilité naturelle, même si des augmentations modestes sont en train de se produire ces dernières années (cf. Trenberth 2005 pour une revue complète). Le nombre d'ouragans dans l'Atlantique Nord a été supérieur à la normale pendant 9 des 11 dernières années (2005 inclus), mais les niveaux étaient presque tout aussi élevés dans les années 1950 et 1960. Le nombre de ces événements n'est pas le seul indicateur: la taille, la durée et l'intensité sont plus importants. Les indices de destructivité potentielle des ouragans montrent, d'une manière générale, une tendance significative à la hausse depuis la moitié des années 70, en raison d'une plus longue durée et d'une plus forte intensité des tempêtes, et cela est fortement lié à la tendance de la hausse des TSO sous jacentes (Emmanuel, 2005). Webster et al. 2005, ont par ailleurs montré que le nombre d'ouragans (et typhons) de catégorie 4 et 5 à significativement augmen-

té sur le globe. Cette tendance se poursuit encore pendant l'été 2005, avec des TSO tropicales bien au dessus de la normale qui atteignent des niveaux records dans le Golfe du Mexique et en Atlantique Nord avec une saison d'ouragans très active comprenant le plus (3) de tempêtes de catégorie 5 (la plus élevée) en une saison, le nombre de tempêtes nommées le plus élevés (21, ex æquo avec 1933), le nombre d'ouragans le plus élevé (12, ex æquo avec 1969), l'ouragan le plus puissant jamais enregistré (Wilma, pression centrale de 882 hPa), l'ouragan le plus fort dans le Golfe (Rita, 897 hPa), et l'ouragan le plus destructeur jamais enregistré (Katrina) et le plus meurtrier depuis 1928 (Katrina)¹.



¹ Statistiques faites au 20 /10/2005.

La saison des tempêtes ne se terminera que fin novembre.

MODÉLISATION ET ATTRIBUTION DU CHANGEMENT CLIMATIQUE

Les meilleurs modèles climatiques englobent la connaissance actuelle des processus physiques du système climatique, les interactions, et la performance de l'ensemble du système. Ils ont été largement testés et évalués au travers des observations, mais ils ne sont pas parfaits, et certains modèles sont meilleurs que d'autres. Les incertitudes proviennent de nos propres défaillances dans la compréhension des processus climatiques présents dans l'atmosphère, l'océan, la terre et la cryosphère, et de la manière dont ils pourraient être représentés au mieux dans les modèles. Malgré ces incertitudes, les meilleurs modèles climatiques actuels sont capables de reproduire le climat du siècle dernier; les simulations d'évolution de la température globale de surface sur les 1000 dernières années sont cohérentes avec les reconstructions paléoclimatiques. Elles sont donc utiles pour mener des expériences numériques du climat et pour avancer des prévisions.

Des progrès considérables ont été effectués dans l'identification du rôle respectif du soleil, de la pollution (aérosols), et des modifications en gaz à effet de serre, comme le dioxyde de carbone. Les aérosols, comme la suie et les particules de sulfate (la brume blanc laiteux qu'on voit des avions) ont une courte durée de vie (de l'ordre d'une semaine), car ils sont éliminés de l'atmosphère par la pluie: leur influence globale est de rafraîchir le climat et peut-être de changer les précipitations. Par contre, les gaz à effet de serre, comme le dioxyde de carbone et le méthane, ne sont pas éliminés, et se caractérisent par une durée de vie d'un siècle ou plus; ils s'accumulent donc dans le temps. Le dioxyde de carbone est aujourd'hui 32 % plus élevé qu'à l'époque préindustrielle, la moitié de

cette augmentation s'étant produite depuis 1970 en raison notamment de la combustion des carburants fossiles et de la déforestation. La concentration de gaz à effet de serre est aujourd'hui plus importante qu'à aucun autre moment sur les 750 000 dernières années.

Les simulations des modèles climatiques qui prennent en compte l'ensemble des paramètres ont clairement montré que le réchauffement global de surface des dernières décennies est la réponse à l'augmentation de la concentration atmosphérique de gaz à effet de serre (Barnett et al., 2005). Quand les modèles tournent sans que l'on introduise dans la composition de l'atmosphère les modifications liées à l'activité humaine, les modèles n'arrivent pas à restituer l'augmentation des températures globales de surface observées depuis la moitié des années 70. Par contre, avec les forçages anthropiques, les modèles simulent les enregistrements de température observés avec une impressionnante fidélité. Ces mêmes expériences par modèle révèlent que les changements dans la luminosité du soleil et dans l'activité volcanique sont responsables d'une partie du réchauffement dans la première moitié du 20ème siècle, de 1920 environ à 1940; les changements dans la circulation océanique y jouent probablement également un rôle.

La capacité des modèles climatiques à simuler le climat passé

La concentration de gaz à effet de serre est aujourd'hui plus importante qu'à aucun autre moment sur les 750 000 dernières années.

nous donne une confiance accrue en leur capacité à simuler le futur. De plus, l'attribution des changements climatiques récents à une concentration augmentée de gaz à effet de serre dans l'atmosphère a des implications directes pour le futur. En raison de la longue durée de vie du dioxyde de carbone et de la lente mise en équilibre des océans, on peut s'attendre à un changement climatique ultérieur même si les émissions de gaz à effet de serre venaient à s'arrêter (Meehl et al., 2005; Wigley, 2005).

Implications

En résumé, la compréhension scientifique du climat montre désormais sans équivoque que le changement climatique lié au réchauffement global est déjà en cours. Des incertitudes subsistent, surtout sur les modalités de ce changement à l'échelle régionale et locale. Mais le climat change et les incertitudes ne rendent que plus impérieuse l'action. En même temps, il faut être conscient du fait que toute mesure d'atténuation entreprise aujourd'hui dans le sens d'une réduction des émissions portera ses effets dans 50 ans et au delà. En conséquence, nous devons nous adapter aux changements climatiques en les planifiant et en améliorant nos prévisions de leur déroulement probable. Le principe de précaution suggère qu'il est vital que toutes les nations identifient les étapes économiquement efficaces à entreprendre afin de contribuer à une réduction importante et sur le long terme des émissions globales de gaz à effet de serre. Les actions entreprises aujourd'hui peuvent amoindrir l'ampleur et ralentir le rythme du changement climatique futur, même s'il est improbable qu'elles l'arrêtent. Alors que certains changements engendrés par le réchauffement global sont bénins voire

La gestion des ressources en eau constituera un défi majeur dans le futur.

bénéfiques, le rythme du changement qui est projeté dépasse tout ce qui à pu se produire au cours des dernières 10 000 années, et il est donc susceptible d'apporter une multitude de perturbations importantes. Il est donc tout aussi vital de planifier comment nous allons faire face à ces changements tels que l'augmentation des sécheresses, les vagues de chaleur, les incendies, les précipitations diluviennes et les risques d'inondation. La gestion des ressources en eau constituera un défi majeur dans le futur. Le choix des actions à prendre ne dépend plus de la science mais de nos systèmes de valeurs. Il s'agit d'équité entre générations, d'équilibre entre pays en voie de développement et pays développés, de développement durable, de confiance dans les capacités d'adaptation de la technologie, et d'impacts sur l'économie et l'industrie. Dans la plupart des cas, il n'est pas tant question de ce qui est à faire mais de comment cela doit être fait en termes d'implémentation et de durée, puisque cela détermine le degré de perturbation des activités en cours.

RÉFÉRENCES

- n Barnett, T. P., D. W. Pierce, K. M. AchutaRao, P. J. Gleckler, B. D. Santer, J. M. Gregory, W. M. Washington, 2005: Penetration of human-Induced warming into the world's oceans, *Science* 309, 284–287.
- n Cazenave, A., and R. S. Nerem, 2004: Present-day sea level change: observations and causes. *Rev. Geophysics*, 42, 3, RG3001, doi:10.1029/2003RG000139.
- n Cohen, S., B. Liepert, and G. Stanhill, 2004: Global dimming comes of age. *Eos, Trans. Amer. Geo-phys. Union*, 85, 362.
- n Dai A., K.E. Trenberth, and T. Qian, 2004b: A global data set of Palmer Drought Severity Index for 1870–2002: Relationship with soil moisture and effects of surface warming. *J. Hydrometeorol.*, 5, 1117–1130.
- n Emanuel, K., 2005: Increasing destructiveness of tropical cyclones over the past 30 years. *Nature*, 436, 686–688.
- n Groisman, P.Ya., R. W. Knight, T. R. Karl, D. R. Easterling, B. M. Sun, and J. H. Lawrimore, 2004: Contemporary changes of the hydrological cycle over the contiguous United States: Trends derived from in situ observations. *J. Hydrometeorol.*, 5, 64–85.
- n Groisman, P.Ya., R.W.Knight, D. R. Easterling, T. R. Karl, G. C. Hegerl and V.N. Razuvaev, 2005: Trends in intense precipitation in the climate record. *J. Climate*, 18, 1326–1350.
- n Hurrell, J.W., et al., 2003: An overview of the North Atlantic Oscillation. In: *The North Atlantic Oscillation: Climatic Significance and Environmental Impact* [Hurrell, J.W., et al. (eds.)]. *Geo-phys. Monogr.*, 134, Amer. Geophys. U., Washington, DC, pp. 1–35.
- n IPCC, 2001: *Climate Change 2001: The Scientific Basis. Contribution of Working Group 1 to the Third IPCC Scientific Assessment.* [Houghton, J.T., et al. (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom, 881 pp.
- n Jones, P.D. and A. Moberg, 2003: Hemispheric and large-scale surface air temperature variations: An extensive revision and update to 2001. *J. Climate*, 16, 206–223.
- n Kaser, G., D.R. Hardy, T. Mölg, R.S. Bradley, and T.M. Hyera, 2004: Modern glacier retreat on Kilimanjaro as evidence of climate change: Observations and facts. *Intl. J. Climatology*, 24, 329–339.
- n Karl, T. R., and K. E. Trenberth, 2003: Modern global climate change. *Science*, 302, 1719–1723.
- n Kwok, R. and J. Comiso, 2002: Spatial patterns of variability in Antarctic surface temperature: Connections to the Southern Hemisphere Annular Mode and the Southern Oscillation. *Geophys. Res. Lett.*, 29, 1705, doi:10.1029/2002GL015415.
- n Liepert, B.G., 2002: Observed reductions of surface solar radiation at sites in the United States and worldwide from 1961 to 1990. *Geophys. Res. Lett.*, 29, 1421, 10.1029/2002GL014910.
- n Lombard, A., A. Cazenave, P-Y Le Traon and M. Ishii, 2005: Contribution of thermal expansion to present-day sea-level change revisited. *Global and Planetary Change*, 47, 1–16.
- n Mears, C.A. and F.J. Wentz, 2005: The effect of diurnal correction on satellite-derived lower tropospheric temperature. *Science*, 309, 1548–1551.
- n Meehl, G. A., et al., 2000: An Introduction to trends in extreme weather and climate events: Observations, socioeconomic impacts, terrestrial ecological impacts, and model projections. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 81, 413–416.
- n Meehl, G.A., W. M. Washington, W. D. Collins, J. M. Arblaster, A. Hu, L. E. Buja, W. G. Strand, H. Teng, 2005: How much more global warming and sea level rise?, *Science*, 307, 1769–1772.
- n Parker, D.E., L.V. Alexander, and J. Kennedy, 2004: Global and regional climate in 2003. *Weather*, 59, 145–152.
- n Peterson, T.C. and T.W. Owen, 2005: Urban heat island assessment: Metadata are important. *J. Climate*, 18, 2637–2646.
- n Randel, W.J. and F. Wu, 2005: Biases in stratospheric temperature trends derived from historical radiosonde data. *J. Climate*, Accepted
- n Rayner, N.A., D.E. Parker, E.B. Horton, C.K. Folland, L.V. Alexander, D.P. Rowell, E.C. Kent and A. Kaplan, 2003: Global analyses of sea surface temperature, sea ice, and night marine air temperature since the late nineteenth century. *J. Geophys. Res.*, 108, 4407, doi:10.1029/2002JD002670.

n Santer, B.D., T.M.L. Wigley, C. Mears, F. J. Wentz, S.A. Klein, D. J. Seidel, K. E. Taylor, P. W. Thorne, M. F. Wehner, P. J. Gleickler, J. S. Boyle, W. Collins, K. W. Dixon, C. Doutriaux, M. Free, Q. Free, J. E. Hansen, G. S. Jones, R. Ruedy, T. R. Karl, J. R. Lanzante, G. A. Meehl, V. Ramaswamy, G. Russell, and G. A. Schmidt, 2005: **Amplification of surface temperature trends and variability in the tropical atmosphere**. *Science*, 309, 1551-1556.

n Scambos, T., C. Hulbe, and M. Fahnestock, 2003: **Climate-induced ice shelf disintegration in the Antarctic Peninsula**. *Antarct. Res. Ser.*, 79, 79-92.

n Sherwood, S., J. Lanzante, and C. Meyer, 2005: **Radiosonde daytime biases and late 20th century warming**. *Science*, 309, 1556-1559.

n Smith, T.M. and R.W. Reynolds, 2005: **A global merged land and sea surface temperature reconstruction based on historical observations (1880–1997)**. *J. Climate*, 18, 2021–2036.

n Thompson, L. G., E. Mosley-Thompson, M. E. Davis, K. A. Henderson, H. H. Brecher, V. S. Zagorodnov, T. A. Mashiotta, P-N Lin, V. N. Mikhailenko, D. R. Hardy, and J. Beer, 2002: **Kili-manjaro ice core records: Evidence of Holocene climate change in tropical Africa**. *Science*, 298, 589-593.

n Trenberth, K., 2005. **Uncertainty in hurricanes and global warming**, *Science*, 308, 1753-1754.

n Trenberth, K.E. and D.J. Shea, 2005: **Relationships between precipitation and surface temperature**. *Geo-phys. Res. Lett.*, 32, L14703, doi:10.1029/2005GL022760.

n Trenberth, K.E., A. Dai, R. M. Rasmussen, and D. B. Parsons, 2003: **The changing character of pre-cipitation**. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 84, 1205–1217.

n Trenberth, K.E., J. Fasullo, and L. Smith, 2005a: **Trends and variability in column integrated atmospheric water vapor**. *Climate Dyn.*, 24, 741-758. doi:10.1007/s00382-005-0017-4.

n Walter, M.T., et al., 2004: **Increasing evapotranspiration from the conterminous United States**. *J. Hydrometeor.*, 5, 405–408.

n Webster, P. J., G. J. Holland, J. A. Curry and H-R. Chang., 2005: **Changes in tropical cyclone number, duration and intensity in a warming environment**. *Science*, 309, 1844-1846.

n Wigley, T. M. L., 2005: **The climate change commitment**. *Science*, 307, 1766–1769.

n Wild, M.A., H. Gilgen, A. Rosech. A. Ohmura, C. Long, E.G. Dutton, B. Forgan, A. Kallis, V. Rus-sak, and A. Tsvetkov, 2005: **From dimming to brightening: Decadal changes in solar radiation at Earth's surface**, *Science*, 308, 847–850.

Pour en savoir plus :

Agence Européenne pour l'Environnement : www.eea.eu.int

UCAR: www.ucar.edu

NCAR : www.ncar.ucar.edu

Kevin Trenberth : www.cgd.ucar.edu/cas/trenbert.html

TEXTE ORIGINAL

Observed Global Changes in Climate

Kevin E. Trenberth - National Center for Atmospheric Research

KEY MESSAGES :

- Global warming is happening. Global surface air temperature is 0.75°C warmer than at the beginning of the 20th century. Nine of the last 10 years (1994-2004) are the warmest years among the 145 years of the instrumental record and, for the northern hemisphere, among the last 1000 years.
- The observed surface temperature changes are consistent with other observed changes indicating warming such as sea surface temperature increases, reductions in snow cover and shorter freeze seasons, glacier and sea ice retreat, ocean temperature increases, global sea level rise, and upper air temperature and water vapor increases. Associated changes in atmospheric circulation amplify these changes in some areas and reduce or even reverse them in others.
- Accompanying the change in mean climate, there is an amplified change in extremes. There are several prominent indications of changes such as: increases of moderate to heavy precipitation events (even in for regions where precipitations are decreasing), increased intensity and duration of droughts, fewer frost days, more high daily temperature extremes, fewer cold nights, and others. North Atlantic storm frequency is still within natural variability but new global evidence supports increases in intensity of

hurricanes and typhoons (notably category 4 and 5 storms), and their destructive capabilities.

- The scientific understanding of climate change is sufficiently clear to show that climate change from global warming is already occurring. The ability of models to simulate past and present climate gives us increasing confidence in their ability to simulate the future.

- Mitigation actions taken now will mainly have benefits 50 years and beyond now. Actions taken now will lessen the magnitude and rate of climate change in the future, although they likely will not stop it since the rate of change as projected exceeds anything seen in nature in the past 10,000 years and is apt to be disruptive in many ways. Hence we will have to adapt to climate change by planning for it and making better predictions of likely outcomes. Actions to take depend on value systems, not science. Issues relate to equity among generations, equity among developed and developing countries, sustainability, confidence in ability to adapt and technological fixes, and impacts on the economy and industry. In many cases it may not be so much what is done as to how it is implemented and over what time period, as this determines the degree of disruption to ongoing activities.

Introduction

This article provides a short summary of recent observed changes in global climate, based on up-to-date observations and analyses as of mid-2005. More detailed background information is provided by IPCC (2001) and Karl and Trenberth (2003).

Observed Changes

a. Surface Temperature

The globe is warming. Claims to the contrary are not credible. In the past few years, improvements have been made to both land surface air temperature and sea surface temperature (SST) data (e.g., Jones and Moberg, 2003; Parker et al., 2004; Rayner et al., 2003; Smith and Reynolds, 2005)

that relate to improved coverage and daily data availability. The global temperature changes over the entire instrumental record (Figure 1) are best described by relatively steady temperatures from 1861-1920, a warming of about 0.3°C to 1950, a cooling of about 0.1°C until the mid-1970s (only in the Northern Hemisphere NH), and a warming of about 0.55°C since then. Thus rates of temperature rise are greater in recent decades and global surface temperatures today are about 0.75°C warmer than at the beginning of the 20th Century. Land regions have warmed the most, with the greatest warming in the boreal winter and spring months over the NH continents. A number of recent studies indicate that effects of urbanization and land-use change on the land-based temperature record are negligible as far as continental -and hemispheric- space averages are concerned, because the very real but local effects are accounted for (Peterson and Owen, 2005).

The warmest year in the 145-year global instrumental record remains 1998, since it was enhanced by the major 1997-98 El Niño. The years 2002–2004 are the 2nd, 3rd and 4th warmest years in the series since 1861 and nine of the last 10 years (1995 to 2004) – the exception being 1996 – are among the ten warmest years in the instrumental record (Fig. 1). Based on reconstructions of temperature from proxy data, like tree rings and ice cores, several studies have also concluded that NH surface temperatures are warmer now than at any time in at least the last 1,000 years.

b. Consistency with other observed changes

Over land a strong negative correlation is observed between precipitation and surface temperature in summer and in low latitudes throughout the year, and areas that have become wetter, such as the eastern United States, have not warmed as much as other land areas (Trenberth and Shea, 2005). Increased precipitation is associated with increases in cloud and surface wetness, and thus increased evaporation (e.g., Walter et al. 2004). Several reports have defined a term, “global dimming” (e.g., Cohen et al., 2004). This refers to a widespread reduction of solar radiation received at the surface of the Earth, at least up till about 1990 (Wild et al., 2005). Although records are sparse, continental-scale estimates of pan evaporation show decreases, due to decreases in surface radiation associated with increases in clouds, changes in cloud properties, and increases in air pollution in different regions from 1970 to 1990 (e.g., Liepert, 2002). There is tentative evidence to suggest that this has reversed in recent years. The enhanced evaporation and reduced temperature increase is physically consistent with enhanced latent versus sensible heat fluxes from the surface in wetter conditions.

The warming described is consistent with a body of other observations indicating a warming world. For example, there has been a widespread reduction in the number of frost days in middle latitude regions, principally due to an earlier last day of frost in spring rather than a later start to the frost season in autumn. There has been an increase in the number of daily warm extremes and a reduction in the number of cold extremes, especially at night. The amount of total water vapor in the atmosphere has increased over the global oceans by $1.3 \pm 0.3\%$ from 1988 to 2003, consistent in patterns and amount with increases in SST and a fairly constant relative

humidity (Trenberth et al., 2005). Widespread increases in surface water vapor are also found. Ocean temperatures have warmed at depth as well, and global sea levels have risen 15-20 centimeters over the 20th Century, with some evidence of an accelerating rate in the past decade (3.0 cm) (e.g., Cazenave and Nerem, 2004; Lombard et al., 2005). As the oceans warm, seawater expands and sea level rises, but glacier melt also contributes.

There has been a nearly worldwide reduction in mountain glacier mass and extent. Tropical ice caps in South America, Africa and Tibet have all shown remarkable declines in recent decades (e.g., Thompson et al., 2003; Kaser et al., 2004). If continued, some may disappear within the next 30 years. Snow cover has decreased in many NH regions, particularly in the spring season, and permafrost has also diminished. Sea-ice extents have decreased in the Arctic, particularly in the spring and summer seasons. The Arctic (north of 65°N) average annual temperature has increased since the 1960s and is now warmer (at the decade timescale) than the 1920–1945 period (where much of the earlier warming was centered). In the Antarctic, regional patterns of warming and cooling are related to changes in the atmospheric circulation. The warming of the Peninsula region since the early 1950s is one the largest and the most consistent warming signals observed anywhere in the world (Kwok and Comiso, 2002). Large reductions in sea-ice have occurred to the west in the Bellingshausen Sea, and on the eastern side of Peninsula, large reductions in the size of Larsen Ice shelf have occurred (e.g., Scambos et al., 2003)

The atmospheric circulation has also changed, and increasing zonal flow is observed in most seasons in both hemispheres, and the mid/high latitude annular modes have strengthened. In the NH this has brought milder maritime air into Europe from the North Atlantic in winter, enhancing warming there (Hurrell et al., 2003). In the SH, where the ozone hole has played a role, it has resulted in cooling over the interior of Antarctica but large warming in the Antarctic Peninsula region and Patagonia, as noted above. Temperatures generally have risen more than average where flow has become more poleward, and less than average or even cooled where flow has become more equatorward, reflecting patterns of variability.

c. Temperatures above the surface

The balloon-borne radiosondes that measure the upper atmosphere temperatures and humidity are only located at land stations and, as they are for monitoring weather, their reliability for climate trends is questionable because of changes in instruments over time. Indeed recent work has exposed a number of changes in radiosonde records (Sherwood et al., 2005; Randel and Wu, 2005). For instance, sensors have become smaller and thus less vulnerable to heating from the sun during daytime, and evidence clearly shows daytime readings were too high in earlier years (compared with night-time measurements).

For these reasons, much attention has been paid to satellite estimates of upper-air temperatures, in particular because they provide global coverage since 1979. However, flaws have been discovered in the original satellite temperature record associated with orbital changes and drift in times of observations of the measurements, and new analyses indicate that the troposphere is warming similarly to the surface after 1979, when the satellite record starts (Mears and Wentz, 2005). At the same time, the stratosphere has undergone strong cooling since 1979, due mainly to observed stratospheric ozone depletion.

The surface and upper-air records of temperature change can now be reconciled, and the overall pattern of observed temperature change in the vertical is consistent with that simulated by today's climate models (Santer et al., 2005). The climate skeptics therefore no longer have a basis for their oft-spread claims based on supposed lack of warming in the satellite record or inconsistencies with model results.

d. Extremes

For any change in mean climate, there is likely to be an amplified change in extremes (see Meehl et al., 2000). The wide range of natural variability associated with day-to-day weather means that we are unlikely to notice most small climate changes except for changes in the occurrence of extremes. We are adapted to a range of natural weather variations, but it is the extremes of weather and climate that exceed tolerances.

So far, the most prominent indication of a change in extremes is the evidence of increases in moderate to heavy precipitation events over the middle

latitudes in the last 50 years, even for regions where annual precipitation totals are decreasing (Trenberth et al., 2003; Groisman et al., 2004, 2005). Droughts are also increasing worldwide since the 1970s, both from recent decreases in rainfall over land and increased evaporation associated with rising temperatures (Dai et al., 2004). Further, the observed trend to fewer frost days is associated with the average warming in most middle latitude regions. Results for temperature-related daily extremes also show widespread increased numbers of warm days/nights (and lengthening of heat waves) and even more reductions in the number of cold days and especially cold nights.

Trends in tropical storm frequency and intensity are masked by large natural variability, although modest increases may be occurring in recent years (see Trenberth, 2005 for a complete review). Numbers of hurricanes in the North Atlantic have been above normal in 9 of the last 11 years (to 2005), but levels were about as high in the 1950s and 1960s. Numbers are not the story though as size, duration and intensity matter more. Indices of the potential destructiveness of hurricanes globally show a substantial upward trend since the mid-1970s due to both longer storm lifetimes and greater storm intensities, and it is strongly related to upward trends in the underlying SSTs (Emanuel, 2005). Webster et al. (2005) have further shown that category 4 and 5 hurricanes (and typhoons) around the world have increased substantially in recent years. The pattern has continued in the summer of 2005, with tropical SSTs well above normal and a very active North Atlantic hurricane season, including the most category 5 (the highest category) storms (3) ever in a season, the largest number of named storms (21, tied with 1933), the largest number of hurricanes (12, tied with 1969), the strongest hurricane on record (Wilma, central pressure 882 hPa), the strongest hurricane in the Gulf ever (Rita, 897 hPa), and the most damaging hurricane on record (Katrina) and deadliest since 1928 (Katrina) [these statistics were as of October 20, 2005, so the season still has a month to go].

Modeling and Attribution of Climate Change

The best climate models encapsulate the current understanding of the physical processes involved in the climate system, the interactions, and the performance of the system as a whole. They have been extensively tested and evaluated using observations, but they are not perfect, and some models are

better than others. Uncertainties arise from shortcomings in our understanding of climate processes operating in the atmosphere, ocean, land and cryosphere, and how to best represent those processes in models. In spite of these uncertainties, today's best climate models are now able to reproduce the climate of the past century, and simulations of the evolution of global surface temperature over the past millennium are consistent with paleoclimate reconstructions. Hence they are useful tools for carrying out numerical climate experiments and making predictions.

Considerable progress has been made on sorting out the role of changes in the sun, pollution (aerosols) and changes in greenhouse gases, such as carbon dioxide. Aerosols, like soot and sulfate particles (the milky white haze seen from airplanes) have a short lifetime (a week or so) as they are washed out of the atmosphere by rain, but their overall influence is to cool the climate and possibly change rainfall. In contrast, greenhouse gases such as carbon dioxide and methane are not washed out, and have lifetimes of a century or longer. Hence they build up in amounts over time, as has been observed. Carbon dioxide is now 32% higher than in pre-industrial times, with half of the increase occurring since 1970 owing mainly to combustion of fossil fuels and deforestation. Greenhouse gas concentrations in the atmosphere are now higher than at any time in at least the last 750,000 years.

Climate model simulations that account for such changes in forcings have reliably shown that global surface warming of recent decades is a response to the increased concentrations of greenhouse gases in the atmosphere (e.g., Barnett et al., 2005). When the models are run without the man-made changes in atmospheric composition, they fail to capture the increase in global surface temperatures since the mid-1970s. But with anthropogenic forcings included, the models simulate the observed temperature record with impressive fidelity. These same model experiments also reveal that changes in solar luminosity and volcanic activity account for part of the warming in the first half of the 20th Century, from about 1920 to 1940, with the ocean circulation changes possibly also playing a role.

The ability of climate models to simulate the past climate record gives us increased confidence in their ability to simulate the future. Moreover, the attribution of the recent climate change to increased concentrations of greenhouse gases in the atmosphere has direct implications for the future. Because of the long lifetime of carbon dioxide and the slow equilibration of the oceans, there is a substantial future commitment to further global cli-

mate change even in the absence of further emissions of greenhouse gases into the atmosphere (Meehl et al., 2005; Wigley, 2005).

Implications

In summary, the scientific understanding of climate change is now sufficiently clear to show that climate change from global warming is already upon us. Uncertainties remain, especially regarding how climate will change at regional and local scales. But the climate is changing and the uncertainties make the need for action all the more imperative. At the same time, it should be recognized that mitigation actions taken now mainly have benefits 50 years and beyond now. This also means that we will have to adapt to climate change by planning for it and making better predictions of likely outcomes. The precautionary principle suggests that it is vital for all nations to identify cost-effective steps that they can take now to contribute to substantial and long-term reductions in net global greenhouse gas emissions. Actions taken now will lessen the magnitude and rate of climate change in the future, although they likely will not stop it. While some changes arising from global warming are benign or even beneficial, the rate of change as projected exceeds anything seen in nature in the past 10,000 years and is apt to be disruptive in many ways. Hence it is vital to also plan to cope with the changes, such as enhanced droughts, heat waves and wild fires, and stronger downpours and risk of flooding. Managing water resources will be a major challenge in the future. Exactly what actions are taken depend on value systems, not science. Issues relate to equity among generations, equity among developed and developing countries, sustainability, confidence in ability to adapt and technological fixes, and impacts on the economy and industry. In many cases it may not be so much what is done as to how it is implemented and over what time period, as this determines the degree of disruption to ongoing activities.

1.2 Changements climatiques observés en France

Jean-Marc Moisselin - Météo-France.

Jean-Marc Moisselin travaille à la Direction de la Climatologie de Météo France. Il est correspondant pour la France pour le programme CLIPS de l'Organisation Météorologique Mondiale et coordinateur du volet observation du projet GICC/IMFREX.

MESSAGES CLÉS

- Au cours du XXe siècle, la température moyenne de la France a augmenté de 0,1°C par décennie. En fin de XXe siècle, le réchauffement en France s'est accéléré à raison de 0,6°C par décennie sur la période 1976-2003.
- Sur 1951-2000 il est net qu'en France les étés sont de plus en plus chauds et qu'il y a de moins en moins de jour de gel en hiver. Il semblerait qu'il y a de plus en plus de vagues de chaleur en été et moins de vagues de froid en hiver.
- Sur 1951-2000, la variabilité des températures maxima-

les présente des signes d'augmentation, notamment en été.

- L'évolution des précipitations est plus contrastée mais montre une augmentation sur les deux tiers nord du territoire avec des contrastes saisonniers marqués, en hausse en hiver et en baisse en été. Les sécheresses estivales sont en augmentation.
- On ne détecte pas à l'heure actuelle de changement notable en France sur certains aspects du climat : les tempêtes, les précipitations intenses.

INTRODUCTION

La prise de conscience autour des changements climatiques a rendu plus impérieuse la nécessité de disposer de chroniques anciennes. La description des changements climatiques régionaux permet d'avancer dans la compréhension des mécanismes en jeu. Elle rend possible l'anticipation de mesures d'adaptation (qui requièrent des données proches des réalités de terrain). Par l'établissement de diagnostics de proximité, elle

contribue à la sensibilisation des décideurs, du grand public et de l'ensemble des secteurs concernés par les changements climatiques.

La Direction de la Climatologie de Météo France a accéléré son programme de recherche et de saisie de données au milieu des années 1990. Des millions de données ont été saisies. Cependant, quel que soit le paramètre, quelle que soit la période étudiée, un constat s'est très vite imposé : les données

La description des changements climatiques régionaux permet d'avancer dans la compréhension des mécanismes en jeu.

brutes sont difficilement exploitables en l'état. En effet, les séries de mesures qui s'étalent sur plusieurs dizaines d'années présentent des ruptures causées par des facteurs extra climatiques (Causinus et al., 2004) : par exemple un changement d'instrument, un déplacement de la station. Il a donc fallu développer des techniques pour « homogénéiser » les longues séries temporelles d'observation afin de constituer les séries de référence nécessaires à l'étude de long terme du climat (Moisselin et al., 2005b). Homogénéiser consiste à détecter et corriger les ruptures sur des séries de paramètres mensuels. Ces techniques ne sont pas applicables aux séries quotidiennes. Les séries quotidiennes de référence sont ensuite obtenues en sélectionnant les périodes sans ruptures



majeures, ruptures détectées sur la série mensuelle correspondante. Au final on dispose pour la France métropolitaine des séries de référence suivantes :

- 70 séries centenaires de températures mensuelles minimales et maximales,
- 300 séries centenaires de cumuls mensuels de précipitations,
- 26 séries 1951-2000 de température quotidienne minimale,
- 43 séries 1951-2000 de température quotidienne maximale,
- 98 séries 1951-2000 de cumuls quotidiens de précipitations.

Des séries de références ont été développées pour d'autres paramètres : séries centenaires mensuelles de pression réduite au niveau de la mer, séries mensuelles 1931-2000 d'insolation, séries 1951-2000 de températures outre-mer (non encore homogénéisées mais qualifiées par les experts locaux), séries du nombre annuel de tempêtes (avec une approche différente (Drevet, 2002)).

Ces séries de référence sont utilisées pour le calcul des indices reconnus par la communauté du climat, en particulier les nombreux indices sur les événements extrêmes. Le site Internet du projet européen ECA&D (European Climate Assessment and Dataset) présente un dictionnaire complet d'indices et les diagnostics observés pour des séries en Europe sur différentes périodes. Le site Internet du projet GICC/IMFEX présente un panorama complet de toutes les séries françaises disponibles, sur différentes périodes et pour un grand nombre d'indices. Une importante (et peut-être déroutante) particularité concerne les indices : ils décrivent des événements se produisant relativement souvent : typique-

ment plutôt tous les 10 jours que tous les 10 ans. Cela tient à des impératifs statistiques de taille d'échantillon (Frei et al., 2001).

ÉVOLUTION DES TEMPÉRATURES

Les séries mensuelles montrent une tendance à la hausse des températures moyennes en France de l'ordre de 1°C sur le XXe siècle (Moisselin, 2002) et de fortes disparités entre les paramètres (réchauffement plus marqué pour les minimales que pour les maximales), entre les régions (gradient du réchauffement est-ouest pour les minimales et nord-sud pour les maximales), et entre les saisons (les minimales ont le plus augmenté en été et les maximales en automne). Le réchauffement s'accélère en fin de siècle et par exemple la tendance 1976-2003 est de l'ordre de $0.6^{\circ}\text{C}/\text{décennie}$.

Les tendances de températures moyennes sur 1951-2000 sont de l'ordre de 0.2 à $0.3^{\circ}\text{C}/\text{décennie}$ (Figure 1). Si on se confronte aux analyses classiques (Easterling, 2000), les conclusions sont nettes pour

- « températures maximales plus élevées »,
- « plus d'étés chauds » (Figure 2),
- « températures minimales plus élevées »,
- « moins de jours de gel » (Figure 3)

et relativement nettes pour

- « plus de vagues de chaleur »,
- « moins de vagues de froid ».

Sur un grand nombre d'indices, l'année 2003 ressort nettement. La richesse des indices a permis aussi de repérer des traces d'augmentation de la variabilité des températures maximales, sur 1951-2000, surtout en été : les températures les plus froides ont moins augmenté que les températures les

plus chaudes. Cet effet de variabilité traduit donc une augmentation des températures estivales élevées plus forte que ne l'aurait laissé supposer le seul examen de la moyenne. Autrement dit, cela indique une évolution du climat plus complexe qu'une simple translation.

ÉVOLUTION DES PRÉCIPITATIONS

Les séries de cumul mensuel de précipitations ont moindre représentativité en raison du volume et de la qualité des séries originales (brutes) et de la forte variabilité spatiale du paramètre (Moisselin et al., 2002). La pluviométrie est en hausse sur les deux tiers nord du territoire au cours du XXe siècle.

On retrouve ce comportement sur la période 1951-2000 (Figure 4). Les contrastes saisonniers sont marqués : cumuls hivernaux nettement à la hausse et cumuls estivaux plutôt en baisse. La moitié des séries présentent des tendances dépassant 2% du cumul annuel par décennie, la grande majorité des départements traités sont en hausse. Une minorité de séries présentent cependant des évolutions statistiquement significatives.

Si on se confronte aux analyses classiques (Easterling et al., 2000), les conclusions sont relativement nettes pour « plus d'événements pluvieux » et, en été, pour des « sécheresses aggravées » ; peu évidentes ou contrastées pour « plus d'événements générant des cumuls journaliers intenses », « plus d'événements générant des cumuls multi-journaliers intenses ». La richesse des indices a permis aussi de repérer un allongement des périodes pluvieuses : plus de la moitié des séries de durée moyenne des périodes pluvieuses sont en hausse significative.

Figure 1 : Nombre annuel de jours de gel à Strasbourg-Enzheim, nombre annuel en noir, moyenne mobile 5 points en rouge, tendance linéaire en vert.

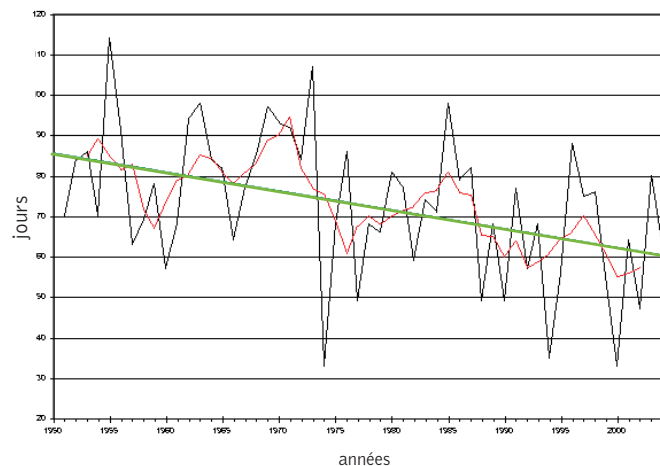
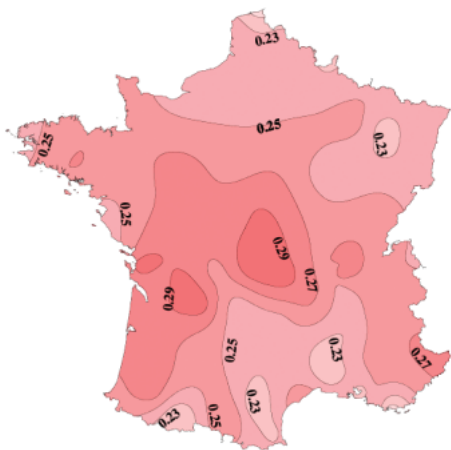
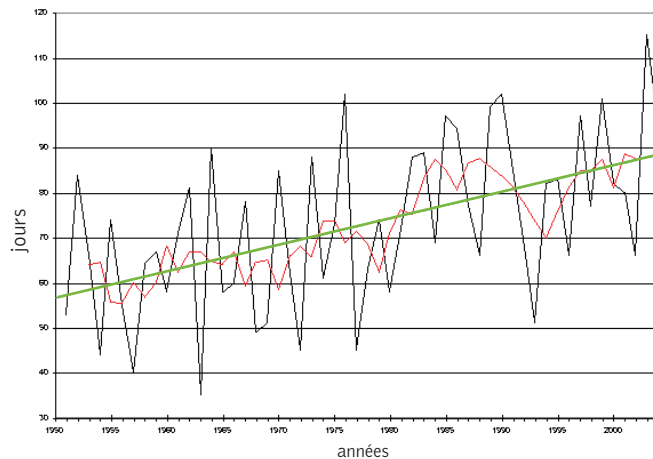


Figure 2 : Nombre annuel de « jours d'été » (lorsque la température maximale dépasse 25°C) à Toulouse-Blagnac, nombre annuel en noir, moyenne mobile 5 points en rouge, tendance linéaire en vert.



(...) l'ensemble des indices relatifs à la température vont tous dans le sens d'un réchauffement marqué.

AUTRES RÉSULTATS

La confrontation des résultats sur l'insolation et la température a permis de confirmer certaines modulations régionales du changement climatique (Moisselin et al., 2005a), de même que les études de détection à échelle régionale (Spagnoli et al., 2002). Les études sur l'évolution du nombre de tempêtes (Drevet, 2002) n'ont pas permis de dégager de tendance significative, tout comme d'autres études sur les épisodes cévenols.

Le réchauffement climatique est aussi une réalité Outre-Mer : sur la période 1976-2003 en Guyane, Martinique, Guadeloupe, Polynésie Française et Nouvelle Calédonie le réchauffement est compris entre 0.3 et 0.4°C/décennie, des valeurs inférieures à celles rencontrées pour la métropole.

CONCLUSION

Des avancées significatives ont été conduites récemment grâce à la constitution de nouvelles séries de référence à résolution quotidienne pour les indices climatiques. Elles montrent que l'ensemble des indices relatifs à la température vont tous dans le sens d'un réchauffement marqué. Pour les précipitations les différents indices montrent des évolutions plus contrastées, hormis certains aspects comme l'aug-

mentation des sécheresses estivales. Certains aspects du climat ne montrent pas (encore ?) de changement significatif : les tempêtes, les précipitations intenses.

Les séries de référence participent également à la validation et la calibration des modèles de climat. Si on associe aux diagnostics observés ceux prévus pour les décennies à venir, on dispose d'un ensemble permettant de mieux cerner les impacts des changements climatiques et de définir de possibles stratégies d'adaptation.

RÉFÉRENCES

- n Caussinus, H., Mestre, O., 2004 : *Detection and correction of artificial shifts in climate series*, Appl. Statist., part 3, 405-425
- n Drevet, C., 2002 : *L'évolution du nombre de tempêtes en France sur la période 1950-1999*, La Météorologie, 37, pp 46-56
- n Easterling, D. R., Meehl, G. A., Parmesan, C., Changnon, S. A., Karl, T. R., Mearns, L. O., 2000 : *Climate extremes, observations, modeling, and impacts*, Science, 289, 2068-2074
- n Frei, C., Schär, C., 2001, *Detection Probability of Trends in Rare Events : Theory and Application to Heavy Precipitation in the Alpine Region*, Journal of Climate, Vol 14, pp1568-1584.
- n Moisselin, J.-M., Schneider, M., Canellas, C., Mestre, O., 2002, : *Changements Climatiques en France au 20ème siècle. Étude des longues séries de données homogénéisées françaises de précipitations et températures*, La Météorologie, 38, pp45-56
- n Moisselin, J.-M., Canellas, C., 2005 : *Longues séries d'insolation homogénéisées en France*, C.R. Géoscience 337, pp729-734
- n Moisselin, J.-M., Dubuisson, B., 2005 : *Evolution des extrêmes en France au cours du XXe siècle, soumis à La Météorologie*
- n Spagnoli, B., Planton, S., Déqué, M., Mestre, O., Moisselin, J.-M., 2002 : *Detecting climate change at a regional scale, 2002: the case of France*, Geophys. Res. Lett., Vol 29, N°10

Pour en savoir plus :

Site CLIVAR : www.clivar.org

Site ECA&D : eca.knmi.nl

Site IMFREX : medias.dsi.cnrs.fr/imfrefx/web/

Site Météo-France : www.meteo.fr

1.3 Les scénarios d'émissions de gaz à effet de serre

Patrick Criqui - Laboratoire d'Economie de la Production et de l'Intégration Internationale.

Patrick Criqui est Directeur de recherche au CNRS et Responsable du département Energie et Politiques de l'Environnement du laboratoire LEPII (CNRS-UPMF Grenoble). Il est membre du Groupe d'Experts sur l'Energie auprès du Premier Ministre, Auteur principal du Troisième Rapport d'Evaluation du GIEC, et Rapporteur du Groupe Energie 2010-2020 du Commissariat Général du Plan (1998).

MESSAGES CLÉS

- L'estimation de l'évolution future des émissions de gaz à effet de serre (GES) est déterminante pour évaluer l'amplitude du réchauffement global et donc des changements climatiques attendus si aucune politique spécifique n'est mise en œuvre.
- Les scénarios du Rapport Spécial sur les Scénarios d'Emissions (RSSE) ont été élaborés par une équipe spéciale du GIEC. Ce rapport propose un jeu de scénarios présentés comme tous également réalistes sur la base d'hypothèses d'évolution socio-économiques. De manière délibérée, ces scénarios n'incluent pas les mesures de réduction des émissions destinées à stabiliser les concentrations atmosphériques de GES de façon à limiter le réchauffement global.
- Les scénarios d'émissions du RSSE se répartissent en quatre grandes « familles » (A1, A2, B1, B2). Les scénarios A2 et B1 sont aux extrêmes en termes d'émissions de GES : de 983 à 1862 milliards de tonnes de carbone de B1 à A2, en cumul sur la période 1990-2100.
- Les scénarios d'émissions du RSSE ont été critiqués et continuent de l'être. Si les débats méthodologiques sont normaux, voire nécessaires pour l'amélioration des connaissances, les procès d'intention suspectant les auteurs de biais politiques sont, en revanche, irrecevables.

- Une deuxième série des scénarios d'émissions de GES est issue des travaux du Groupe 1 du GIEC qui évalue les aspects scientifiques de l'évolution du climat. Chacun des ces scénarios est contraint par un niveau maximum de concentration atmosphérique de GES prédéterminé. On dispose ainsi d'une série de profils d'émission compatibles avec différents objectifs de stabilisation de la concentration atmosphérique des GES.
- Pour stabiliser la concentration atmosphérique de CO₂ à 450 ou 550 ppmv¹, il faut dans les deux cas que les émis-

INTRODUCTION

L'élaboration des scénarios d'émissions constitue une étape-clé dans la construction des savoirs sur le changement climatique, les risques encourus et les politiques à mettre en œuvre. En effet, l'intensité du réchauffement climatique dépendra pour une large part des émissions des gaz à effet de serre (GES) liées à l'activité humaine. Selon le Troisième Rapport d'Evaluation du GIEC, l'incertitude sur l'amplitude du réchauffement global dépend pour moitié de l'incertitude sur la sensibilité du système climatique², et pour moitié des scénarios socio-économiques envisagés.

On distingue deux types de scénarios socio-économiques suivant l'absence ou la présence de mesures de réduction des émissions de GES. Les premiers (sans mesures) permettent d'évaluer l'ampleur des changements climatiques auxquels nous conduirait le développement « spontané » du système énergétique mondial, les seconds (avec mesures) permettent d'estimer les inflexions nécessaires pour respecter les différents objectifs climatiques possibles.

sions mondiales de carbone plafonnent avant 2030, et qu'en 2050 les niveaux d'émission soient ramenés respectivement, à 70% et à 140 % de ceux de 1990.

- En plus des changements de comportement indispensables, quatre « portefeuilles technologiques » sont destinés à jouer un rôle-clé dans la limitation des émissions carbone: la maîtrise de la demande d'énergie, les énergies renouvelables, l'énergie nucléaire et les techniques de capture et stockage du CO₂. La contribution relative de ces options dépendra non seulement d'une problématique technico-économique, mais aussi de choix de société.

Il importe de souligner dès l'abord le paradoxe suivant : plus les scénarios « sans politique » conduisent à des niveaux d'émission élevés, plus il est nécessaire de mettre en œuvre des politiques d'atténuation vigoureuses, qui apparaissent d'autant plus sévères, coûteuses et difficilement acceptables : les scénarios « avec mesure » seront donc d'autant plus difficiles à mettre en œuvre qu'ils seront nécessaires. On retrouvera cette question de manière récurrente chaque fois qu'il s'agira d'articuler analyse économique des politiques climatiques et décision publique sur ce sujet.

Dans ce qui suit, on présente d'abord les scénarios « sans politique » du Rapport Spécial du GIEC sur les Scénarios d'Emission, avant d'évoquer la controverse qui s'est développée autour de ces scénarios, et enfin de fournir quelques éléments

¹ppmv pour partie par million en volume. 450 ppmv veut dire dans 1 m³ d'air il y a 445 millièmes de m³ de CO₂.

² La sensibilité climatique est le réchauffement à l'équilibre (après ajustement du climat) pour un scénario donné d'émission de GES. Typiquement, on considère un doublement de la concentration atmosphérique de CO₂ par rapport à la valeur pré-industrielle (de 280 à 560 ppm environ).

sur les scénarios alternatifs de réduction des émissions de GES.

LES SCÉNARIOS D'ÉMISSION DE GAZ À EFFET DE SERRE DU GIEC

Lancé en 1995, achevé en 2000, le Rapport Spécial du GIEC sur les Scénarios d'Emission (RSSE³) a constitué un effort sans précédent pour développer une prospective mondiale visant à construire des images du futur cohérentes, tout en identifiant les principales incertitudes. L'étude a été menée dans un cadre ouvert, c'est à dire permettant à des équipes multiples, et disposant de modèles différents, de fournir leurs propres scénarios.

Une des idées premières et structurantes du RSSE a été qu'aucun scénario ne pouvait et ne devait être qualifié de « plus probable » ou « central ». Il s'est agit alors de développer plusieurs familles de scénarios harmonisés, à partir de quatre grandes « forces motrices »⁴ : la démographie, la croissance économique, les ressources et la technologie. Ceux-ci sont alors déclinés selon deux jeux d'hypothèses structurantes : d'une part le « primat de la croissance ou de l'environnement », d'autre part « convergence ou fragmentation mondiale ». Le croisement de ces deux jeux d'hypothèses permet de définir quatre familles, les scénarios A1, A2, B1, B2 (TABLEAU 1).

Les scénarios de type « A » supposent un monde où la croissance s'opère selon un modèle d'activité, de consommation et de technologies très proche du modèle actuel, alors que dans les scénarios « B » les structures d'activité changent, laissant émerger une économie des services, à faible contenu en matières premières et en énergie, marquée par la diffusion de nouvelles technologies et la recherche de la viabilité des

Tableau 1 : Définition des quatre familles de scénarios du RSSE

	Convergence	Fragmentation
Croissance	A1 (A1F1, A1B, A1T)	A2
Environnement	B1	B2

modes de développement. Dans les scénarios de type « 1 » les différentes régions du monde non seulement connaissent des évolutions comparables, mais leurs modèles de développement se rapprochent en termes quantitatifs et qualitatifs, alors que les scénarios « 2 » décrivent une situation de fragmentation, de différences et d'écarts maintenus entre ces régions.

Ainsi le scénario A2 décrit-il un monde en croissance assez faible, en raison en particulier de sa fragmentation persistante, mais où les émissions restent élevées, du fait de la relative faiblesse du changement technologique comme de la dématérialisation des activités. Inversement, le scénario B1, bien que présentant un niveau de croissance plus élevé, conduit à des émissions cumulées en 2100 deux fois plus faibles, en raison d'une convergence vers des technologies et activités peu intensives en énergie et matières premières.

De plus, dans le scénario A1, la prise en compte des ressources et des technologies énergétiques permet de construire

³équivalent de l'acronyme SRES pour Special Report on Emission Scénarios (www.grida.no/climate/ipcc/emission/)

⁴ en anglais "drivers"

trois variantes: A1FI intensif en énergies fossiles, A1B équilibré, et A1T intensif en technologies énergétiques sans carbone. A partir de cette grille, plus de quarante scénarios ont été simulés par les différentes équipes. Cela reflète l'incertitude qui pèse non seulement sur les « forces motrices », mais aussi sur l'ensemble des variables et paramètres ; d'ailleurs, même les scénarios marqueurs suffisent à eux seuls à faire apparaître une très large fourchette pour les principaux résultats. Entre le scénario B2 et A1FI les émissions énergétiques en

2100 varient de 3,8 à 30,3 GtC/an ; entre B1 à A1FI les émissions cumulées sur plus d'un siècle varient de 983 à 2189 GtC (TABLEAU 2).

Il apparaît donc clairement que, si l'exercice RSSE a permis de mobiliser différentes équipes et modèles et assuré une cohérence d'ensemble et une bonne organisation des résultats, il a aussi fait apparaître des incertitudes et des paradoxes. En particulier, il est troublant de constater que des

Tableau 2 : Les principaux résultats des scénarios-marqueurs du RSSE

Les scénarios "marqueurs" du RSSE			A1FI	A1 A1B	A1T	A2	B1	B2
Population (milliards)	1990	5,3						
	2020		7,6	7,4	7,6	8,2	7,6	7,6
	2050		8,7	8,7	8,7	11,3	8,7	9,3
	2100		7,1	7,1	7	15,1	7	10,4
PIB (1000 Milliards \$/an)	1990	21						
	2020		53	56	57	41	53	51
	2050		164	181	187	82	136	110
	2100		525	529	550	243	328	235
Coefficient de revenu [Rev/hab Ann 1] /[Rev/hab Non Annexe 1]	1990	16,1						
	2020		7,5	6,4	6,2	9,4	8,4	7,7
	2050		2,8	2,8	2,8	6,6	3,6	4
	2100		1,5	1,6	1,6	4,2	1,8	3
Energie primaire (Gtoe/an)	1990	8,4						
	2020		15,9	16,9	15,4	14,2	14,4	13,5
	2050		34,1	32,1	28,9	23,1	19,3	20,7
	2100		49,3	53,0	48,1	40,9	12,2	32,3
Carbone Energie (GtC/an)	1990	6						
	2020		11,2	12,1	10	11	10	9
	2050		23,1	16	12,3	16,5	11,7	11,2
	2100		30,3	13,1	4,3	28,9	5,2	3,8
Carbone Sols (GtC/an)	1990	1,1						
	2020		1,5	0,5	0,3	1,2	0,6	0
	2050		0,8	0,4	0	0,9	-0,4	-0,2
	2100		-2,1	0,4	0	0,2	-1	-0,5
C E+S cumulé (GtC)		1990-2100	2189	1499	1068	1862	983	1164

Source: GIEC, Rapport Spécial sur les Scénarios d'Emission, 2000

jeux d'hypothèses économiques proches peuvent conduire à des résultats très différenciés du point de vue des émissions cumulées (par exemple A1FI et A1T), alors qu'inversement, des scénarios socio-économiques très dissemblables peuvent conduire à des résultats proches pour les émissions cumulées (B2 et A1T).

On touche là à l'une des problématiques de fond que le rapport RSSE soulève: quel message les décideurs doivent-ils retenir ? Que faire en effet du diagnostic suivant : « selon les hypothèses retenues dans les scénarios socio-économiques, les émissions cumulées de gaz à effet de serre au cours de ce siècle varieront du simple au double » ? Rappelons encore qu'il ne s'agit ici que de scénarios « sans politique » ...

LA CONTROVERSE SUR LES SCÉNARIOS DU GIEC

Incontestablement, les scénarios du RSSE ont constitué une base solide et validée pour une part importante des travaux du Troisième Rapport d'Évaluation du GIEC. Cela n'a pas pour autant empêché l'émergence de controverses, ce qui est par ailleurs normal et constitutif de tout processus scientifique digne de ce nom. Celles-ci se concentrent en particulier sur les hypothèses de croissance économique, par la contestation à la fois du mode de mesure utilisé⁵ et des hypothèses retenues. Le dernier rapport de la Chambre des Lords sur « l'économie du changement climatique » (Select Committee on Economic Affairs, Juin 2005), est systématiquement critique et suspicieux à l'égard des travaux du GIEC. Il fournit néanmoins un utile inventaire des différents aspects de la controverse sur les scénarios :

- La mesure du PIB « au taux de change du marché » ten-

Incontestablement, les scénarios du RSSE ont constitué une base solide et validée pour une part importante des travaux du Troisième Rapport d'Évaluation du GIEC.

draît à surestimer la croissance mondiale et donc les niveaux d'émission dans les scénarios « sans politique » ; le risque climatique serait donc également surestimé et ainsi « dramatisé ».

- En particulier, la croissance serait surestimée dans les scénarios A1 puisqu'elle s'élève à 3%/an en moyenne d'ici à 2100, chiffre qui semble concevable pour les 30 prochaines années, mais excessif sur un siècle.
- Les scénarios du GIEC ne seraient pas équiprobables, certains supposant des ruptures par rapport aux tendances historiques, soit pour la dynamique des émissions, soit pour la convergence des revenus et la croissance dans les régions en développement.

La critique portée est donc celle de l'existence de biais dans la méthodologie et les hypothèses, qui contribueraient à dramatiser l'importance du problème. Dès 2003, en réaction à une première vague de critiques, les principaux auteurs du RSSE avaient apporté un ensemble de réponses argumentées

⁵ Le premier point constitue un débat ancien. Le problème est de savoir si le poids de l'économie de chaque région doit être mesuré au « taux de change du marché » ou par un taux de change dit de « parité de pouvoir d'achat » qui tient compte des différences structurelles de prix entre pays industriels et pays en développement. Pour les pays en développement la mesure au taux de change du marché conduit à sous-estimer le niveau du PIB réel, mais corrélativement à surestimer sa croissance



et complètes (Nakicenovic N. et al., 2003) ; pour autant le débat n'est pas clos.

Ce débat doit être poursuivi sur les aspects techniques pertinents et non sur la base d'un procès « d'intentions politiques » prêtées aux auteurs du RSSE (alors même que l'utilisation politique de scénarios dramatisés serait ambivalente, on l'a noté plus haut). Parmi les points principaux :

- Les difficultés soulevées par la mesure de la croissance sont réelles et devraient être approfondies, en mettant l'accent en particulier sur la nécessaire cohérence entre le mode de calcul adopté et la projection de la réduction des intensités énergétiques.
- De même, l'effort d'amélioration des outils de modélisation et de scénarisation pour l'économie et l'énergie doit à l'évidence être accentué, mais aucune institution internationale ne fournit aujourd'hui d'analyse structurée sur la croissance

économique mondiale à très long terme.

LES SCÉNARIOS DE RÉDUCTION DES ÉMISSIONS DE GAZ À EFFET DE SERRE

Aux scénarios « sans politiques » répondent des scénarios d'atténuation du changement climatique par la réduction des émissions de gaz à effet de serre. Ils sont le plus souvent définis, notamment dans les travaux du Groupe de Travail 1⁶ du GIEC, comme devant répondre à des profils d'émission assurant la stabilisation des concentrations à des niveaux pré-établis : communément, pour le CO₂, 450, 550, 650 ppmv etc.. Rappelons que les scénarios A du RSSE conduisent, à l'ex-

⁶ Le GIEC se compose de trois groupes de travail et d'une équipe spéciale pour dresser les inventaires nationaux des GES. Le Groupe 1 évalue les aspects scientifiques de l'évolution du climat, le Groupe 2 s'occupe de la vulnérabilité des systèmes naturels et socio-économiques aux changements climatiques et les possibilités de s'y adapter et le Groupe 3 évalue en termes économiques les solutions envisageables pour limiter les émissions de GES ou atténuer de toute autre manière les changements climatiques.

ception de A1T, à des profils de concentration très supérieurs à 1000 ppmv, et que les deux scénarios B et le scénario A1T s'inscrivent quant à eux sur des trajectoires comprises entre 550 et 650 ppmv.

Parmi les ordres de grandeur robustes et utiles à retenir pour la décision publique, il apparaît que, pour atteindre les niveaux de stabilisation de 450 et de 550 ppmv-CO₂, il faut que les émissions mondiales plafonnent avant 2030, et qu'en 2050 les niveaux d'émission soient ramenés respectivement, à 70% et à 140 % de ceux de 1990⁷ (FIGURE 1)

L'ensemble des travaux du Groupe de Travail 3 du GIEC permet de dresser un inventaire des potentiels technologiques et économiques pour l'atténuation, des politiques et mesures susceptibles d'être mises en œuvre, et enfin des coûts et avantages, directs et indirects, de la mise en œuvre des options d'atténuation. Mais le Groupe de Travail 3 ne privilégie pas le choix d'un scénario d'atténuation. D'autres études ont permis l'exploration de scénarios alterna-

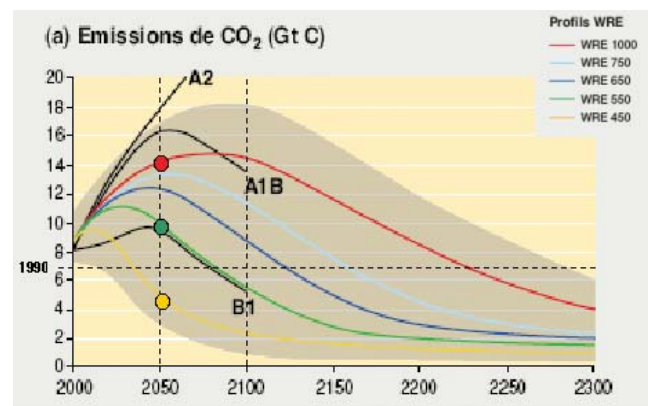


Figure 1 : profils d'émission à 2100 pour trois des scénarios du RSSE (B1, A1B, A2), ainsi que six profils d'émission (WRE 450 à 1000) permettant la stabilisation des concentrations (d'après l'étude WRE, pour Whigley, Edmonds et Richels). Source : GIEC, RSSE

tifs pour la réduction des émissions. C'est le cas notamment en Europe, au niveau de l'Union et dans plusieurs Etats-Membres. Ainsi l'étude Greenhouse gas Reduction Pathways (GRP, LEPII-EPE et al. 2003) a-t-elle conduit à explorer, d'une part des profils d'émission susceptibles de satisfaire l'objectif climatique européen⁸ et, d'autre part la répartition de l'objectif global entre les grandes catégories de pays, pour plusieurs systèmes d'allocation des droits mondiaux d'émission.

La méthodologie est ici sensiblement différente de celle du RSSE, puisque l'étude GRP s'appuie sur une « projection de base » (Baseline), définie comme une hypothèse centrale en l'absence de politique climatique (au-delà des engagements déjà pris). Cette projection de base présente un profil d'émis-

⁷ L'année 1990 est l'année de référence retenue dans le protocole de Kyoto pour le niveau d'émissions.

⁸ Qui vise à limiter l'augmentation moyenne des températures à +2°C par rapport à la situation pré-industrielle.

sion assez comparable à celui du scénario A1B du RSSE, avec un doublement en 2050 par rapport à 1990, malgré une croissance économique plus faible que dans le scénario A1B, mais en raison d'un fort appel au charbon (FIGURE 2). A cette projection de base sont donc opposés deux scénarios-objectif visant à une stabilisation des concentrations pour les six Gaz à Effet de Serre (GES) du Protocole de Kyoto (TABLEAU 3).

- Le premier scénario-objectif fixe les concentrations de GES à 650 ppmv (ou 550 ppmv pour le seul CO2). Cela correspondrait à une augmentation de température attendue d'environ +2,5°C par rapport à l'époque pré-industrielle et de +1,9°C par rapport à aujourd'hui. Pour cet objectif, les pays de l'Annexe 1 du Protocole de Kyoto (les pays industrialisés) devraient diviser les émissions par un facteur 2, par rapport à 1990.
- Le deuxième scénario-objectif fixe les concentrations de GES à 550 ppmv (ou 450 ppmv pour le seul CO2). Cela correspondrait à une augmentation de température de +1,6°C par rapport à l'époque pré-industrielle et de +1°C par rapport à aujourd'hui. Pour cet objectif, les pays de l'Annexe 1

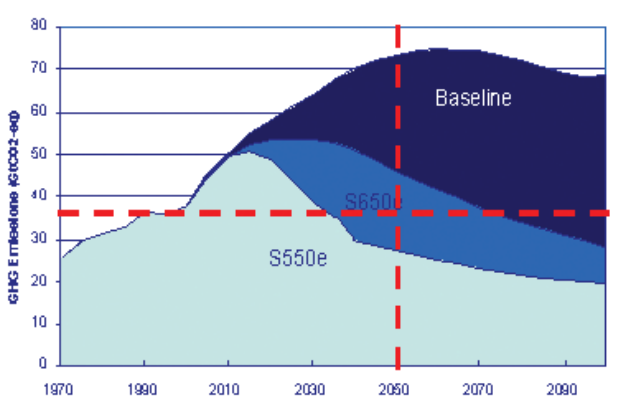


Figure 2 : Profils d'émission à long terme « sans mesures » (Baseline) et pour deux hypothèses de stabilisation (550 et 650 ppmv) des 6 GES du Protocole de Kyoto. Source: Modèle IMAGE, étude Greenhouse gas Reduction Pathways.

devraient diviser des émissions par un facteur 4, par rapport à 1990.

C'est dans cette perspective que s'inscrivent les scénarios dits « Facteur 4 », développés dans plusieurs pays européens – dont la France – et qui visent à diminuer les émissions des trois-quarts en 2050. Ces scénarios, extrêmement ambitieux, constituent aujourd'hui la frontière à explorer dans les ana-

Tableau 3 : Les scénarios de l'étude Greenhouse gas Reduction Pathways

Profil d'émission	Augmentation de Température (IPCC2001)	Objectifs 2050 par rapport à 1990	
		Annexe I	Non Annexe I
S650e S550 CO2	+ 2.5°C / pre-ind. + 1.9 °C / auj.	Division par Facteur 2	x 2 Pays Emergents x 5 Pays Moins Avancés
S550e S450 CO2	+1.6 °C / pre-ind. + 1.0 °C / auj.	Division par Facteur 4	x 1 Pays Emergents x 3 Pays Moins Avancés

Source: Auteur, d'après l'étude Greenhouse gas Reduction Pathways pour la Direction Générale « Environnement » de la Commission Européenne

lyses de prospective économique et énergétique, pour définir les traits structurants d'une société à bas profil d'émission.

Ces analyses font apparaître le rôle-clé de quatre grands « portefeuilles technologiques » :

1. La maîtrise de la demande, avec en particulier le rôle des équipements « TBE » (Très Basses Emissions) dans le bâtiment et les transports.
2. Les énergies renouvelables, avec les énergies-flux, éolienne, solaire et hydraulique ou la biomasse, combustible et carburant.
3. L'énergie nucléaire, avec les réacteurs dits de troisième et quatrième génération.
4. La Capture et Stockage du CO₂, pour les installations de grande puissance dans la production d'électricité ou des industries telles que la sidérurgie ou les cimenteries.

Parmi les premiers enseignements des études de ce type aujourd'hui disponibles pour la France, il apparaît que plus l'objectif est ambitieux et plus il devient difficile de se passer de l'une – a fortiori de deux – de ces quatre options. La question reste néanmoins ouverte de la contribution respective de ces quatre grands portefeuilles technologiques, ainsi que des changements de comportement qui resteront indispensables, à la construction d'une société sans carbone.

RÉFÉRENCES

n GIEC, Rapport Spécial sur les Scénarios d'Emission, 2000 , www.grida.no/climate/ipcc/emission/

n Select Committee on Economic Affairs, The Economics of Climate Change, House of Lords, Juin 2005
http://www.parliament.uk/parliamentary_committees/lords_economic_affairs.cfm

n Nakicenovic N. et al., IPCC SRES Revisited: a response, Energy & Environment, Vol.3, Nos. 2-3, 2003
<http://www.iiasa.ac.at/Research/TNT/WEB/Publications/ipcc-sres-revisited/ipcc-sres-revisited.html>

n LEPII-EPE et al. (2003), Greenhouse reduction Pathways in the UN_FCCC process up to 2025, EU-DG Environment, <http://europa.eu.int/comm/environment/climat/studies.htm>

n Hubert Prévot (2004), Diviser par trois en trente ou quarante ans nos émissions de CO₂
<http://www.2100.org/PrevotEnergie/>

n Pierre Radanne (2004), La division par quatre des émissions de CO₂ en France d'ici 2050
<http://www.effet-de-serre.gouv.fr/fr/etudes/Facteur4-franc%20BAT.pdf>

n ENERDATA et LEPII-EPE (2005), Prospective énergétique concernant la France
<http://www.industrie.gouv.fr/energie/prospect/textes/prosp-jr-2030-2050.htm>

Pour en savoir plus :

Programme Grid Arendal de l'agence Environnemental de Nations Unies www.grida.no

1.4 Changements climatiques futurs globaux

Hervé Le Treut - Laboratoire de Météorologie Dynamique

Hervé Le Treut est directeur de recherches au CNRS, professeur à l'Ecole Polytechnique, et directeur du Laboratoire de Météorologie Dynamique de l'Institut Pierre Simon Laplace. Hervé Le Treut est membre du JSC (Joint Scientific Committee) du Programme de Recherche Climatique Mondiale, et participe au GIEC (Lead Author, rapport 2001, Convening Lead Author, rapport 2005).

MESSAGES CLÉS

- La modélisation globale du climat a fait au cours des dernières décennies des progrès considérables: les modèles actuels sont très différents des modèles utilisés dans le premier rapport de l'GIEC. Malgré cela, les résultats récents confirment ceux qui ont été obtenus il y a déjà quelques années, en amplitude de réchauffement comme en structure à grande échelle.
- Les simulations réalisées dans le cadre du GIEC utilisent les scénarios d'émissions de gaz à effet de serre connus comme ceux du RSSE. Le réchauffement global annoncé pour 2100 par le rapport 2001 se situe dans une fourchette de 1.8°C à 6°C. Cet écart apparemment très grand reflète en fait une incertitude due pour moitié à la physique des modèles et pour moitié aux scénarios d'émissions eux-mêmes.
- C'est ainsi que la valeur de 1.8°C de réchauffement, cor-

respondant au bas de la fourchette ne peut être atteinte qu'en supposant à la fois un scénario de stabilisation des émissions en 2100 au niveau de 2000 environ, et un modèle très peu sensible à l'augmentation des gaz à effet de serre.

- Les changements climatiques ne sont pas uniformément répartis au niveau géographique. Le réchauffement est accentué sur les continents (par comparaison aux océans) et aux hautes latitudes, tendance que l'on retrouve de manière atténuée au niveau européen. Les régimes de pluie sont caractérisés par une intensification des situations existantes : plus de pluie dans les régions pluvieuses, plus de sécheresses dans les régions semi-arides. Cet effet est à moduler par un déplacement possible des structures correspondantes. Au niveau européen cela se traduit le plus souvent par un risque de pluies plus importantes et de tempêtes au Nord (surtout

en hiver) et un risque de sécheresse au Sud (surtout en été).

- Le système climatique comporte des sous-systèmes qui évoluent lentement et le relèvement du niveau de la mer de quelques dizaines de centimètres attendu en 2100 dépend très largement des émissions de gaz à effet de serre qui ont déjà eu lieu.
- Le système climatique comprend des rétroactions amplificatrices du réchauffement tel que le rôle de la végétation dans la capture du carbone, qui commencent juste à être prises en compte. Ces effets peuvent ajouter un ou plusieurs degrés au réchauffement global.

INTRODUCTION

Le développement d'études climatiques à l'échelle régionale est étroitement dépendant de la réalisation d'études préalables à l'échelle globale. La réalisation d'un scénario de changement climatique se fait toujours en essayant d'abord de déterminer l'impact d'une augmentation des gaz à effet de serre sur le climat global de la planète, à l'aide de modèles couplés océan/atmosphère qui ont une résolution spatiale grossière (quelques centaines de kilomètres de résolution horizontale) mais simulent le climat des décennies à venir, puis en essayant de l'affiner (à un horizon temporel spécifié donné) à l'aide de modèles régionaux qui ont une résolution spatiale de quelques kilomètres ou quelques dizaines de kilomètres. Cette approche implique que les études à l'échelle d'un pays comme la France reproduisent, voire amplifient, les erreurs commises à l'échelle planétaire et confère une très grande importance aux simulations climatiques globales.

Les changements climatiques ne sont pas uniformément répartis au niveau géographique. Le réchauffement est accentué sur les continents (par comparaison aux océans) et aux hautes latitudes

Un historique bref permet de situer le caractère récent de ces exercices de modélisation des impacts climatiques globaux, et donc a fortiori des exercices de modélisations des impacts régionaux ou locaux, qui en découlent. En 1990 le premier rapport du GIEC (IPCC, 1990) présentait les simulations de trois modèles en réponse à un doublement prolongé du CO₂ atmosphérique. Il s'agissait de modèles atmosphériques de basse résolution spatiale, couplés à des modèles océaniques très fortement idéalisés (couche d'eau bien mélangée de quelques dizaines de mètres d'épaisseur). Une seule de ces simulations, celles du Met Office britannique, avait été comparée à la simulation d'un véritable modèle couplé océan-atmosphère, intégrant donc une représentation numérique de l'océan profond. Les conclusions de cet exercice ancien restent valides aujourd'hui : le réchauffement simulé était plus importants aux Pôles et aux hautes latitudes, plus importants sur les océans que les continents. Cette différence océan/continent était affectée par le couplage à un océan

actif, démontrant ainsi le rôle de l'inertie thermique des océans dans la distribution globale du réchauffement. Malgré des conséquences régionales très différenciées selon les modèles, les modifications des précipitations tendaient à s'ordonner selon un mode global commun, consistant à accentuer la situation actuelle : plus de pluie vers la zone équatoriale et les régions de moyennes latitudes, déjà pluvieuses, alors que la ceinture subtropicale semi-aride était soumise à des risques de sécheresse accentués. Dans les années qui ont suivies un grand nombre de groupes de modélisations a pu accéder à la réalisation de scénarios de réponse du climat à un doublement du CO₂ atmosphérique : le réchauffement simulé par ces modèles en moyenne globale (qui sert à définir la sensi-



bilité climatique) s'est inscrit dans une fourchette allant d'un peu moins de 2°C à un peu plus de 5°C, qui était proche de l'estimation allant de 1.5°C à 4.5°C faite par Charney une dizaine d'années plus tôt, sur la base de deux modèles. Elle reste d'actualité aujourd'hui - voir par exemple les résultats

du Troisième rapport du GIEC (IPPC, 2001) -, et fournit une mesure de l'incertitude qui continue d'affecter les résultats des modèles. Les simulations d'ensembles réalisées récemment avec le modèle du Hadley Centre confirment aussi cette plage d'incertitude (Stainforth et al, 2005). Des exercices de comparaison entre modèles déjà anciens mais qui restent d'actualité ont montré le rôle capital joué par les nuages dans cette dispersion des résultats (Cess et al, 1989)

Au cours de la dernière décennie les modèles ont évolué dans trois directions complémentaires :

1. L'usage des modèles couplés océan/atmosphère s'est généralisé. Ils se sont progressivement affranchis de l'usage des corrections artificielles appelées « correction de flux » (Sausen et al, 1988). Il est aussi devenu possible de vérifier leur capacité à simuler les fluctuations naturelles du climat – un préalable nécessaire si l'on veut utiliser les résultats de ces modèles pour préparer des scénarios régionaux. Sur la région Européenne, plusieurs régimes statistiquement bien établis dominent la variabilité atmosphérique. Le plus célèbre correspond à l'Oscillation Nord Atlantique, une modification de l'intensité relative de la dépression d'Islande et de l'anticyclone des Açores, qui se manifeste à des échelles de temps multi-annuelles, et que les modèles simulent désormais correctement (sans en maîtriser probablement tous les mécanismes)

2. L'augmentation des ressources en temps de calcul a permis un gain en résolution spatiale qui est resté modéré : dans le deuxième rapport du GIEC, beaucoup de modèles atmosphériques présentaient encore une résolution horizontale de 500 km environ (T21 dans le domaine spectral) ; dans la série de

simulations récentes réalisées pour le quatrième rapport du GIEC, en cours de rédaction, une résolution de 300 km correspond à une basse résolution, et plusieurs simulations à « haute » résolution (un peu plus de 100km, ou T106 dans le domaine spectral) ont été réalisées. L'arrivée de machines calculant à des vitesses de plusieurs dizaines de Teraflops, comme le Earth Simulator au Japon, devrait renforcer cette tendance

3. Les modèles ont intégré une diversité de processus de plus en plus grande. Confinés au départ au domaine des échanges physiques entre l'atmosphère, les océans et les surfaces continentales, ils ont inclus progressivement des représentations des cycles biogéochimiques (cycle du carbone, du soufre), incluant aussi des éléments d'une chimie atmosphérique souvent complexe (ozone, méthane, oxydes d'azote ...)

LES SCÉNARIOS DE RÉCHAUFFEMENT CLIMATIQUE DU GIEC

L'utilisation de ces modèles pour la réalisation de scénarios climatiques futurs s'est faite largement dans le contexte du GIEC. À côté de scénarios idéalisés (1% d'augmentation annuelle du CO₂ atmosphérique) les modélisateurs se sont tournés vers les scénarios définis dans le cadre du RSSE (Rapport Spécial sur les Scénarios d'Émission) (GIEC, 2000) pour mettre en place des simulations des climats futurs. Ces scénarios correspondent à des évolutions de notre planète cohérentes au niveau socio-économique (avec un développement plus ou moins mondialisé, plus ou moins sensible à la contrainte énergétique), traduites en termes d'émissions de gaz à effet de serre et d'aérosols. Ces scénarios déjà anciens restent utilisés encore aujourd'hui pour les simulations

climatiques : quatre scénarios de référence (A1, A2, A3 et A4) avaient été retenus au départ et ont été complétés par des variantes du scénario A1 (cf article de P. Criqui). Ces scénarios correspondent à des évolutions très contrastées. Le plus optimiste (B1) correspond à une stabilisation des émissions de la plupart des gaz en 2100 au niveau de l'an 2000 environ, alors que d'autres conduisent au contraire en 2100 à des émissions de CO₂ à peu près trois fois plus élevées.

Le choix de ces scénarios a permis de réaliser des expériences correspondant à des évolutions datées du changement climatique, de 1850 environ à 2100. C'est à partir de ces simulations que le rapport 2001 du GIEC a présenté des résultats conduisant ainsi à un réchauffement de 1.8°C à près de 6°C en 2100 (Figure 1). Il est important de voir que cette fourchette est dépendante à la fois de l'incertitude sur les modèles, et de l'incertitude sur les scénarios. La valeur basse de la fourchette (1.8°C) n'est atteinte que pour le cas très optimiste du scénario B1, et pour des modèles peu sensibles à une perturbation radiative. La médiatisation de la fourchette de résultats de l'IPCC 2001 a conduit à des malentendus, conduisant à penser que l'ensemble de la fourchette traduisait les incertitudes de la modélisation climatique, alors que la moitié environ traduit les différences entre scénarios, et donc au contraire la marge de manœuvre qui subsiste à nos sociétés face au futur. Les résultats présentés ici montrent de manière unanime que le réchauffement futur va constituer une rupture forte vis-à-vis des évolutions passées, mais aussi vis-à-vis du début de réchauffement qui a déjà eu lieu.

Ces scénarios réalisés dans le cadre du GIEC (2001) (et une grande partie de ceux qui ont été réalisés plus récemment

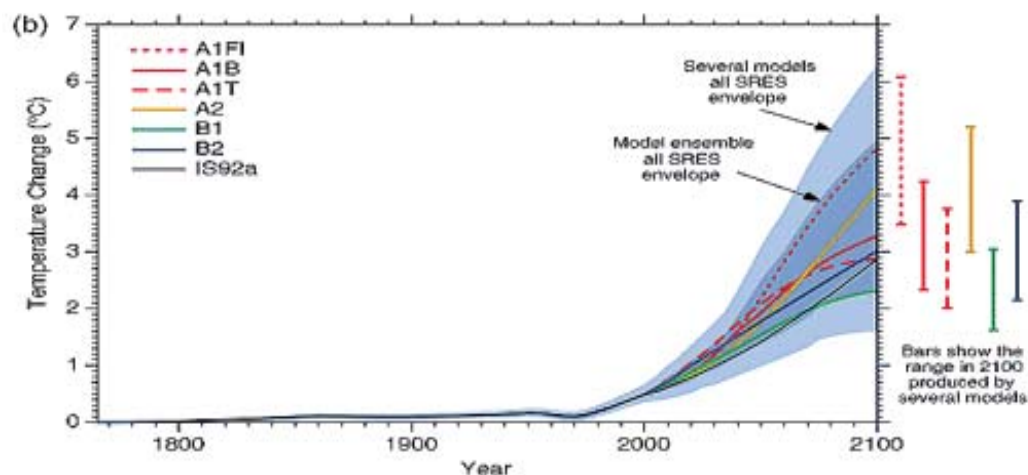


Figure 1 : L'évolution globale de la température de la planète (IPCC, 2001). Chaque code de couleurs renvoie à un scénario ; la hauteur des barres à droite indique la dispersion des résultats attachés à un scénario donné.

pour préparer le rapport à venir du GIEC) peuvent néanmoins être considérés comme « optimistes » car il ne prennent pas en compte plusieurs effets amplificateurs possibles, et en particulier les rétroactions liées au cycle du carbone. Les simulations réalisées à l'IPSL et au Hadley Centre (Cox et al, 2000 ; Friedlingstein, 2001 ; suivis maintenant par plusieurs groupes) ont montré que l'action du climat sur la végétation et les océans, en diminuant la part du CO₂ que reprennent ces milieux, peut amplifier les variations à venir de quelques degrés. D'autres rétroactions potentielles ne sont pas prises en compte dans ces simulations, et particulier la possibilité d'un largage de méthane depuis le fond des océans ou le sol gelé de Sibérie en cas de réchauffement.

LES CHANGEMENTS CLIMATIQUES RÉGIONAUX

La réponse des modèles globaux à l'augmentation des gaz à effet de serre n'est pas seulement marquée par une incertitu-

de sur l'amplitude finale des perturbations, mais aussi de leur localisation. Ces incertitudes seront bien sûr reportées vers les modèles de plus petite échelle.

Plusieurs tendances qualitatives émergent cependant de manière assez robuste. La description des résultats récents des simulations réalisées à l'IPSL et au CNRM permettront de les illustrer. On peut retenir que :

- le réchauffement est plus fort sur les continents que les océans ; ce résultat affecte très fortement le Nord de l'Europe et les zones d'altitude en Europe, avec une fonte accélérée du manteau neigeux en hiver (voir Figure 2). L'Atlantique Nord est caractérisé par un réchauffement moindre (voire un léger refroidissement), qui résulte d'un ralentissement du transport d'eau vers le Nord dans certains modèles (situation souvent appelée « arrêt du Gulf Stream » mais qui correspond plutôt à son déplacement). Cette aug-

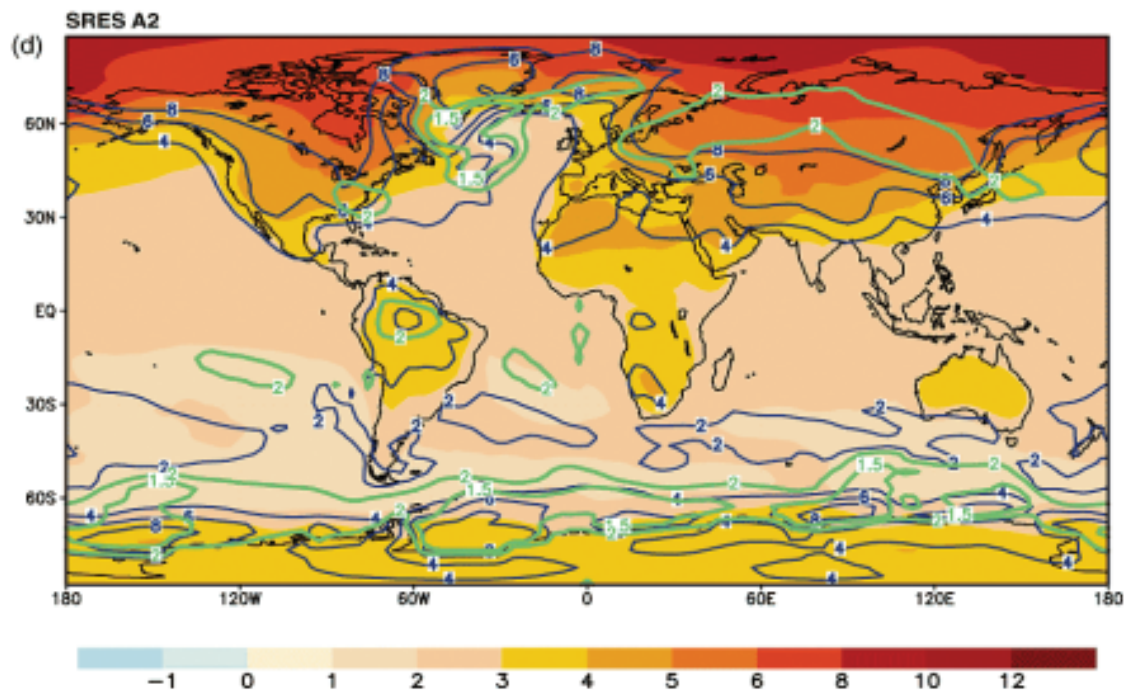


Figure 2 : Les plages de couleurs montrent le réchauffement moyen simulé en moyenne sur l'ensemble des modèles pour le scénario A2 (IPCC, 2001), alors que les iso-lignes donnent une indication de l'écart entre les modèles (voir commentaires dans le texte).

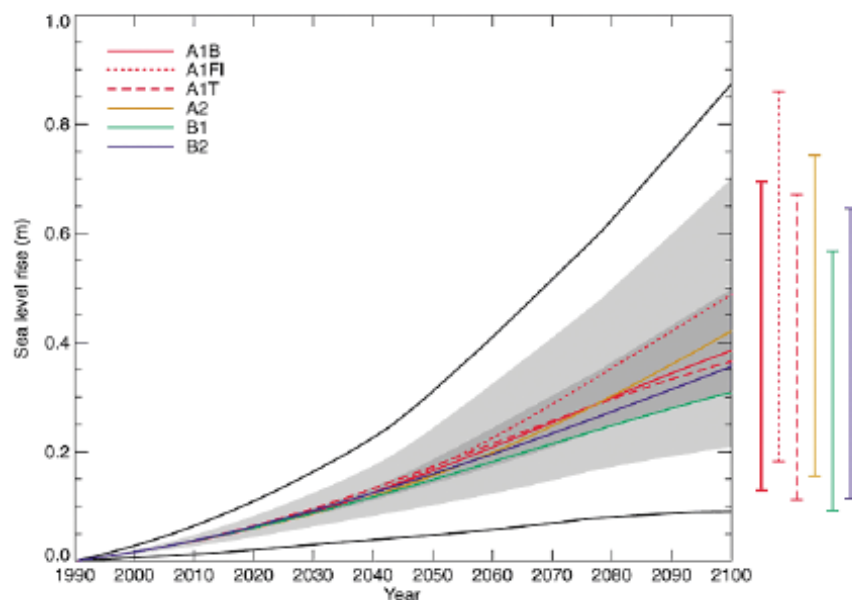


Figure 3 : Relèvement du niveau de la mer tout au long du 20ème siècle (IPCC, 2001). Les codes de couleurs sont les mêmes que pour la Figure 1. L'évolution mesurée en 2000 par les satellites (3mm par an, soit 30cm par siècle) est en bon accord avec l'évolution calculée indépendamment par les modèles climatiques, qui prévoient qu'elle devrait encore s'accélérer au cours du siècle à venir. Par contre elle ne dépend plus du scénario envisagé pour les émissions de gaz à effet de serre au 21ème siècle (pas de séparation claire entre les domaines couverts par les barres de couleurs à droite), mais bien des émissions qui ont eu lieu au 20ème siècle.

mentation de température moindre se transmet de manière modérée à l'Europe, qui continue de se réchauffer.

- Les précipitations (qui ne sont pas montrées dans ce texte) évoluent en marquant une différence forte entre le Nord de l'Europe, plus marqué par des tempêtes, surtout en hiver, et le Sud qui risque d'être marqué par des sécheresses. Un contraste Ouest-Est existe également sur l'Europe, de manière moins unanime : la sécheresse estivale est plus marquée à l'Ouest dans certains modèles, alors qu'à l'Est des inondations sont au contraire possibles.

- Le relèvement du niveau de la mer prédit par les modèles (de 20 à 80 cm d'augmentation par rapport au niveau actuel en 2100) va affecter toutes les zones côtières de l'Europe. Il est en bon accord avec les observations actuelles (3mm par an). Il dépend très peu du scénario retenu, c'est-à-dire que les évolutions en cours dépendent des émissions du XXème siècle. (voir Figure 3)

L'usage de modèles régionaux forcés par les conditions aux limites de grande échelle résultant d'une telle diversité de scénarios ne peut pas permettre de réduire la variété des évolutions futures simulées, et risque au contraire de l'accroître. Par contre les modèles régionaux permettent et permettront d'apporter une meilleure description des effets liés à l'orographie, et au détail des influences locales sur le climat.

RÉFÉRENCES

n Cox PM, Betts RA, Jones CD, Spall SA and Totterdell IJ, 2000: *Acceleration of global warming due to carbon-cycle feedbacks in a coupled climate model*, *Nature*, Vol. 408, 184-187.

n Cess RD et al (1989) *Interpretation of cloud-climate feedback as produced by 14 atmospheric general circulation models*. *Science*, 245, 513-516.

n Friedlingstein P, Bopp L, Ciais P, Dufresne J-L, Fairhead L, LeTreut H, Monfray P, Orr J, 2001: *Positive feedback between future climate change and the carbon cycle*. *Geophys. Res. Lett.*, Vol.28, No.8, pp. 1543-1546.

n IPCC, 1990: *Scientific Assessment of Climate change – Report of Working Group I*, JT Houghton, GJ Jenkins and JJ Ephraums (Eds) Cambridge University Press, UK. pp 365

n IPCC, 2000: *Special Report on Emission Scenarios, 2000: A special report of Working Group III of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, Cambridge University Press, 599 pp.

n IPCC, 2001: *Climate Change: The Scientific Basis, Contribution of Working Group I to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC)* J. T. Houghton, Y. Ding, D.J. Griggs, M. Noguer, P. J. van der Linden and D. Xiaosu (Eds.) Cambridge University Press, UK. pp 944

n Manabe, S., K. Bryan, and M.J. Spelman, *A Global Ocean-Atmosphere Climate Model. Part I. The Atmospheric Circulation*, *Journal of Physical Oceanography*, 5(1):3-29, 1975.

n Sausen, R., K. Barthel, and K. Hasselman, 1988: *Coupled ocean-atmosphere models with flux correction*. *Climate Dyn.*, 2, 145-163.

n D. Stainforth, T. Aina, C. Christensen, M. Collins, N.Faull, D.J.Frame, J.A.Kettleborough, S.Knight, A.Martin, J.M.Murphy, C.Piani, D.Sexton, L.A.Smith, R.A.Spicer, A.J.Thorpe & M.R.Allen, 2005: *"Uncertainty in predictions of the climate response to rising levels of greenhouse gases"*, *Nature*, Vol 433: 403-406.

Pour en savoir plus :

IPSL : www.ipsl.jussieu.fr

LMD : www.lmd.jussieu.fr

Projet Européen ENSEMBLES : www.ensembles-eu.org

GIEC : www.ipcc.ch

Résultats GIEC récents

Serge Planton, Météo France CNRM

Pascale Braconnot, Institut Pierre Simon Laplace, Laboratoire des Science du Climat et de l'Environnement

Dans le cadre de la préparation du prochain rapport du GIEC à paraître en 2007, et de la demande de la Mission Interministérielle sur l'Effet de Serre avec le soutien des organismes de recherche (CNRS, CEA, Météo-France), la communauté climatique française vient de réaliser un exercice de simulation du climat sans précédent. Cet exercice de simulation du climat est aussi inédit au niveau international. Pour l'élaboration du précédent rapport (2001), seuls 8 groupes de modélisation avaient pu réaliser les simulations de scénarios de changement climatique recommandées, et seulement 2 scénarios d'émissions pour le futur avaient été analysés à partir de l'ensemble des modèles (scénarios A2 et B2).

L'exercice actuel rassemble les résultats de 14 groupes de modélisation, dont l'IPSL et le CNRM, et l'ensemble des simulations de scénarios climatiques à réaliser a été largement étendu. Ces simulations, recommandées par le GIEC, s'appuient sur des scénarios d'émission des gaz à effet de serre et de particules (aérosols) liés aux activités humaines qui couvrent l'ensemble des 20ème et 21ème siècles (voir article de P. Criqui). Les scénarios pour le futur comprennent aussi, pour la première fois, des scénarios de stabilisation des concentrations qui, pour certains, préfigurent l'impact de mesures de réduction des émissions faisant suite au protocole de Kyoto.

Les premiers résultats obtenus avec l'ensemble des modèles ayant participé au même exercice suggèrent qu'il est illusoire de s'attendre à une réduction des incertitudes des projections climatiques. Pourtant, globalement, les modèles ont été améliorés depuis le précédent exercice. La complexité du système climatique (banquise, rôle des grands fleuves, ...) est mieux représentée. La raison de ce paradoxe et de cette incertitude tient à la complexité des différentes rétroactions qui se produisent dans le système climatique et la difficulté de leur représentation dans les modèles.

Les deux modèles français ont un comportement satisfaisant vis à vis de nombreux critères climatologiques et une sensibilité (augmentation de température pour un scénario donné) légèrement plus forte que la moyenne des autres modèles. Malgré les nombreuses différences concernant la représentation des caractéristiques de la circulation de l'atmosphère et de ses couplages avec la circulation océanique, les surfaces continentales et la glace de mer, les deux modèles simulent un réchauffement planétaire moyen similaire : +4°C en 2100 pour le scénario le plus pessimiste (scénario A2) (voir Figure 1) et +2° à 2,5°C en 2100 pour le scénario B1, le plus optimiste en terme d'émissions de gaz à effets de serre (voir Figure 2). Les résultats des scénarios indiquent que la stabilisation

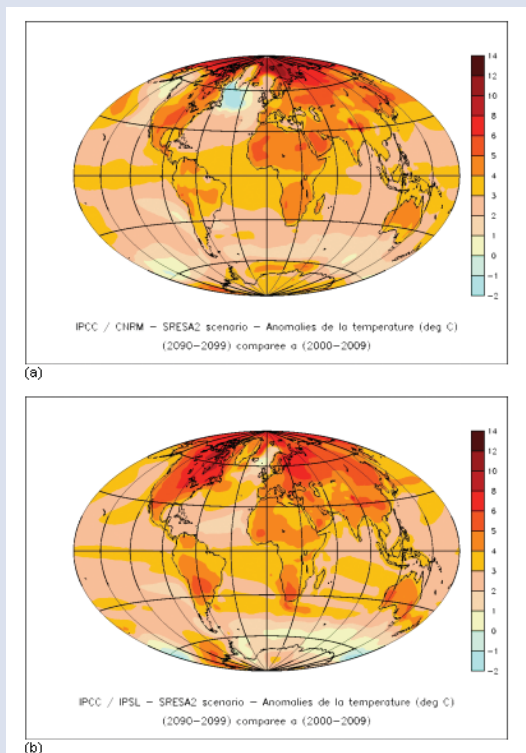


Figure 1 : Changement de température moyenne entre la période 2090-2099 et la période 2000-2009, simulé par le modèle du CNRM (a) et par le modèle de l'IPSL (b), en suivant le scénario A2 du GIEC.

de la concentration du gaz carbonique ne suffit pas à maintenir la température planétaire. Le système climatique continue de se réchauffer d'autant plus fortement que les émissions en gaz à effet de serre sont élevées. Ainsi, les deux modèles français suggèrent une augmentation de température additionnelle d'environ 0.5°C pour le scénario B1 et de 0.7°C pour le scénario A1B à l'horizon de 2300, après stabilisation des concentrations de gaz à effet de serre aux valeurs de 2100. A très grande échelle d'espace (tropiques, moyennes et hautes latitudes, continents par rapport aux océans), les deux modèles présen-

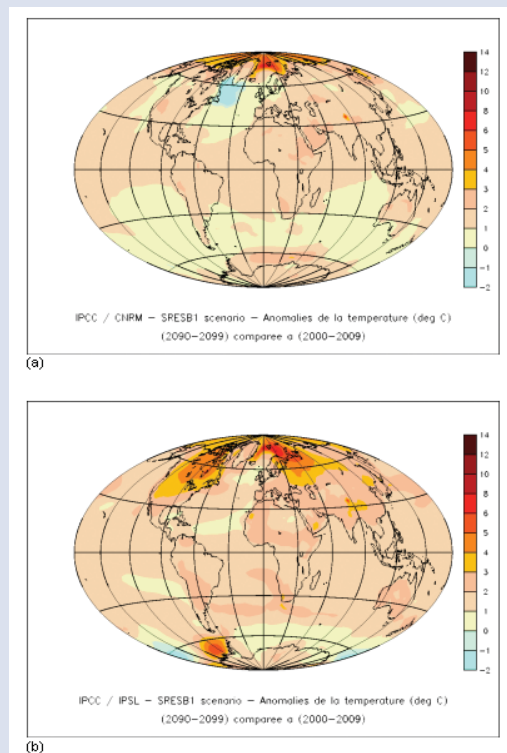


Figure 2: Idem Figure 1 pour le scénario B1.

tent une répartition très comparable des changements de température ou de précipitations. Cependant, à l'échelle d'une région particulière de la planète (comme l'Atlantique Nord ou les régions de mousson), les différences sont notables. Cela montre l'intérêt d'utiliser plusieurs modèles, dont les comportements sont différents à ces échelles. Une analyse approfondie de l'origine des différences, conduite par un groupe de chercheurs de différents laboratoires (ESCRIME : « Etude des scénarios climatiques réalisés par l'IPSL et du CNRM »), permettra de mieux appréhender la question des incertitudes.

1.5 Changements climatiques futurs en France

Serge Planton - Météo France.

Serge Planton est responsable du groupe de recherche climatique du Centre National de Recherches Météorologiques à Météo-France.

MESSAGES CLÉS

Quelque soit le scénario de changement climatique considéré :

- Il est très probable que les vagues de chaleurs estivales seront à la fois plus fréquentes, plus longues et plus intenses.
- Il est probable que les précipitations intenses augmenteront en hiver, mais surtout que les périodes de sécheresse seront plus longues en été.
- Les changements concernant les tempêtes ne paraissent pas significatifs.

L'intensité des changements futurs en France dépend de l'amplitude du réchauffement planétaire. Les conséquences des scénarios d'émission de gaz à effet de serre B2 et A2 du GIEC calculés par des modèles climatiques sont présentés

dans cette étude :

- Suivant le scénario B2, la température moyenne en France augmenterait de 2° à 2,5° entre la fin du 20ème et la fin du 21ème siècle, les précipitations augmenteraient faiblement en hiver et diminueraient plus fortement en été (de 5 à 25%).
- Suivant le scénario A2, les changements climatiques seraient beaucoup plus marqués avec un réchauffement plus important (3° à 3,5°), un assèchement plus important en été (de 20 à 35%) et surtout un effet accru sur les événements extrêmes. En particulier, un été sur deux de la fin de siècle (2070-99) serait au moins aussi chaud que l'été 2003.

INTRODUCTION

Les changements climatiques futurs à l'échelle de la France sont plus difficiles à estimer que les changements climatiques futurs à l'échelle de l'ensemble de la planète.

Une première raison est que le changement climatique ne sera pas uniforme mais dépendra des caractéristiques clima-

tiques de chaque région du globe. Pour ce qui concerne la France, en hiver, notre climat dépend en particulier des trajectoires des dépressions qui se développent au-dessus de l'Atlantique Nord et qui peuvent, par exemple, poursuivre leur chemin vers le Nord-Est de l'Europe ou rester bloquées au large de nos côtes. On parle du « rail des dépressions »

dont les caractéristiques varient d'un jour à l'autre et d'un hiver à l'autre. Pour citer un autre exemple, en été, la température dépend en partie de l'humidité du sol, les conditions de forte sécheresse étant favorables à l'amplification des épisodes caniculaires. Il est donc nécessaire - en particulier car il ne s'agit là que d'exemples - de préciser l'impact du changement climatique sur les trajectoires des dépressions en Atlantique Nord et sur le bilan hydrique des sols en France pour évaluer les changements climatiques futurs à l'échelle de notre pays.



le changement climatique ne sera pas uniforme mais dépendra des caractéristiques climatiques de chaque région du globe.

Une autre raison de la difficulté d'estimer les changements climatiques futurs à l'échelle de la France, est l'incertitude des simulations du climat à cette échelle. En effet, la part de l'incertitude sur les changements climatiques globaux qui est liée à la modélisation elle-même, s'accroît lorsqu'on s'intéresse à une région particulière de la planète : à une échelle réduite, les processus sont d'une plus grande complexité et sont donc plus difficilement représentés dans les modèles du système climatique qui sont utilisés pour les simulations du GIEC à l'échelle planétaire (cf. art. de H. Le treut). C'est la raison pour laquelle on fait généralement appel à d'autres types de modèles, dits régionaux, qui ont l'avantage de décrire des phénomènes de plus petites dimensions grâce à leur résolution spatiale plus fine sur la région d'intérêt (actuellement de 50 à 100km contre 200 à 300km pour les modèles climatiques de grande échelle). Ils ne permettent cependant pas de s'affranchir des incertitudes inhérentes à la simulation du climat dans toute sa complexité.

Les changements climatiques futurs en France que nous allons évoquer ici sont déduits d'ensembles de simulations réalisées avec des modèles climatiques régionaux français (ceux de Météo-France et de l'IPSL). Elles ne couvrent pas tous les scénarios possibles et en particulier pas les scénarios de stabilisation des concentrations des gaz à effet de serre

récemment simulés à grande échelle (voir article de P. Criqui). Il est cependant possible de distinguer dans les résultats de ces études récentes, deux scénarios de changement climatique types, associés à deux scénarios d'émissions des gaz à effet de serre et des aérosols liées aux activités humaines. Ces derniers sont les scénarios dits A2 et B2 de GIEC (voir article de P. Criqui).

LES CHANGEMENTS CLIMATIQUES MOYENS

Suivant le scénario B2, l'augmentation de température moyenne en France serait de l'ordre de 2° à 2,5° plus chaude sur la période 2070-2099 par rapport à la période 1960-1989 choisie comme référence (Tableau 1). Le réchauffement serait plus important en été qu'en hiver. Les précipitations seraient quant à elles légèrement plus importantes en hiver, mais seraient plus nettement diminuées en été. Sur l'ensemble de l'année les précipitations auraient tendance à diminuer, mais de quelques pour cent seulement.

Suivant le scénario A2, les changements climatiques seraient nettement plus marqués (Tableau 1). Le réchauffement serait, en moyenne annuelle, plus important de 1°C que pour le scénario précédent, cette différence étant plus marquée en

été qu'en hiver. Les précipitations seraient quant à elles un peu plus fortement augmentées en hiver, mais surtout plus fortement diminuées en été.

Les différences de température peuvent paraître modestes. Il faut cependant les mettre en rapport avec la variation de température moyenne existant en France. Pour des régions connaissant le même type de climat (en dehors des régions de montagne et du pourtour Méditerranéen), une variation de température de 1°C représente un déplacement en latitude de 200 km. Par ailleurs, la carte des changements climatiques ne serait pas homogène sur l'ensemble du pays. Il est difficile d'en préciser les contours en raison des incertitudes sur les projections, mais toutes les simulations montrent un réchauffement plus marqué en été sur le sud du pays. Pour fixer un ordre d'idée, les écarts d'amplitude du réchauffement d'une région à l'autre peuvent dépasser 2°C.

Les changements de précipitations (Tableau 1) montrent aussi d'importantes différences à l'échelle des différentes régions de France avec une tendance commune pour un assèchement estival plus marqué dans le sud du pays. Ici aussi pour fixer un ordre d'idée, des écarts de 40% sont possibles d'une région à une autre.

	Températures			Précipitations		
	Année	Hiver	Eté	Année	Hiver	Eté
Scénario B2	2° à 2,5°	1,5° à 2°	2,5° à 3,5°	-5% à 0	0 à +10%	-25% à -5%
Scénario A2	3° à 3,5°	2,5° à 3°	4° à 5°	-10% à 0	+5% à +20%	-35% à -20%

Tableau 1 : Valeurs typiques des changements climatiques moyennés sur la France entre la période 2070-2099 et la période 1960-1989 (simulations climatiques Météo-France et IPSL).

Figure 1 : Changements de températures moyennes d'été (mois de juin-juillet-août) simulés pour la période 2070-2099 par rapport à la période 1960-1989, suivant les scénarios B2 (a) et A2 (b). (Source IMFREX, 2004)

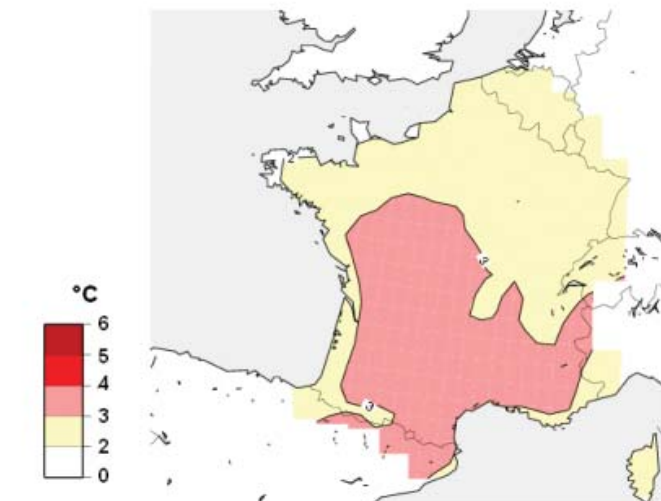
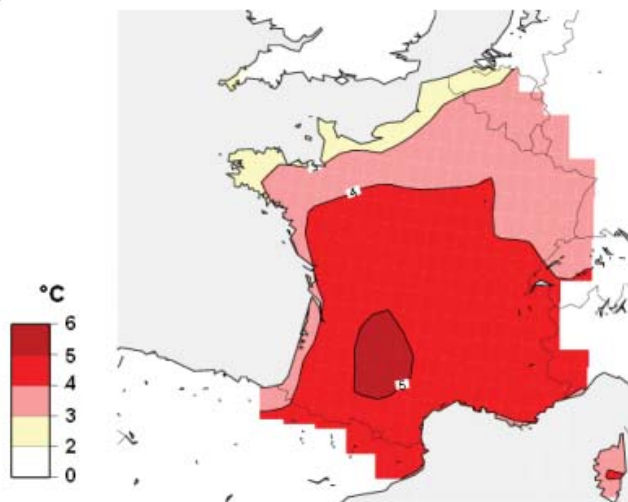


Figure 1-a



A titre d'illustration, nous montrons les résultats d'une simulation suivant le scénario B2 et d'une autre simulation suivant le scénario A2 (Figure 1). Il s'agit de cartes de différen-

ces de températures estivales simulées entre la période 2070-2099 et la période 1960-1989. Ces simulations ayant été réalisées avec le même modèle, ces cartes illustrent la différence du changement climatique liée seulement au scénario. Il apparaît clairement que la différence de température moyenne de 1°C à l'échelle annuelle et sur la France peut masquer des disparités régionales beaucoup plus importantes pour une saison donnée.

LES CHANGEMENTS D'ÉVÉNEMENTS EXTRÊMES

Un climat n'est pas seulement défini par la valeur moyenne des paramètres climatiques mais aussi par leurs valeurs extrêmes. Compte tenu de l'impact très important que peuvent avoir ces événements tant sur l'homme que sur la société, il est nécessaire de tenter d'évaluer le changement climatique aussi sous cet aspect.

En raison du changement climatique, il est très probable que les vagues de chaleur estivales seront à la fois plus fréquentes, plus longues et plus intenses. Une façon de caractériser les vagues de chaleur consiste à comptabiliser le nombre de jours où la température estivale dépasse 35°C. Typiquement, pour le climat de la période 1960-1989, ce nombre n'excède pas en moyenne 1 jour par été sur la France, même s'il peut atteindre localement de l'ordre de 4 jours dans une partie du sud-est de la France. La Figure 2 montre pour les deux modèles français, la fréquence d'occurrence de ces journées pour la période 1960-1989 et pour la période 2070-2099 en faisant l'hypothèse du scénario A2. Elles montrent un fort accroissement de cette fréquence. Pour le modèle qui calcule le changement le plus important, la moyenne sur la France du nombre de jours passerait approximativement de 1 à 14

jours. Le résultat est ici aussi très dépendant du scénario. Pour le scénario B2 et le même modèle, ce nombre passerait de 1 à environ 7 jours.

Une autre façon de traduire l'impact du changement climatique sur les extrêmes de températures consiste à analyser les étés les plus chauds. Pour la période récente, l'été 2003 fait bien sûr exception avec une température qui a dépassé la normale climatique de 4,3°C. Or, suivant le scénario A2, la température moyenne estivale des 30 dernières années de ce siècle pourrait être sensiblement la même que celle de l'été

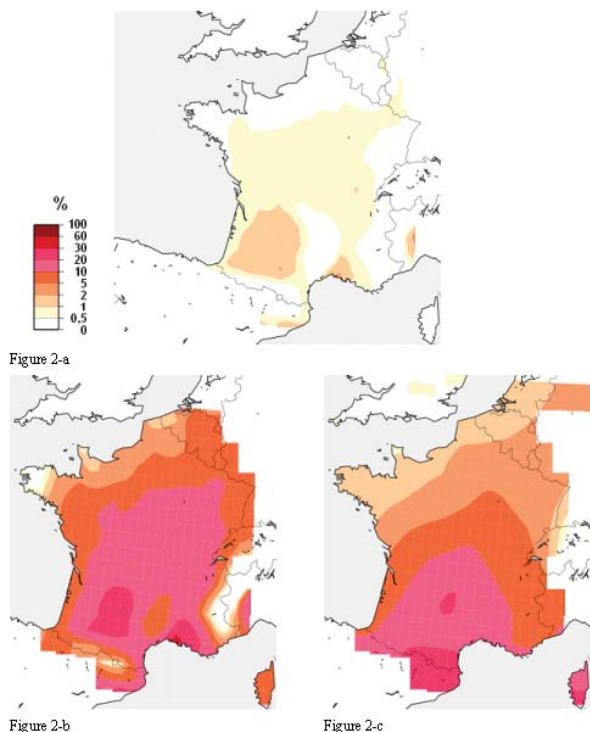


Figure 2 : Fréquence de jours très chauds en été (températures supérieures à 35°), pour la période 1960-1989 (a) et simulées pour la période 2070-2099 par les modèles climatiques régionaux de Météo-France (b) et de l'IPSL (c) suivant le scénario A2. (Source IMFREX, 2004)

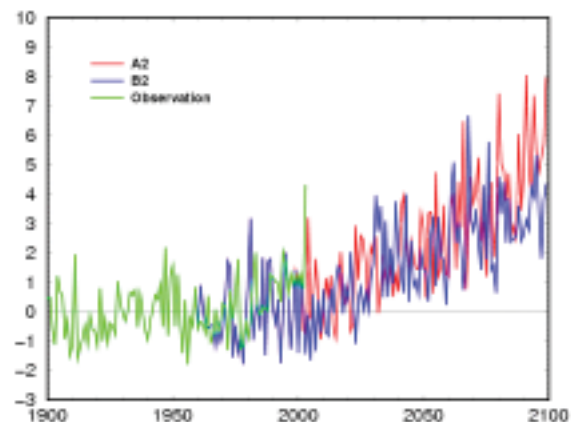


Figure 3 : Changements de températures moyennes d'été (mois de juin-juillet-août) par rapport à la période 1960-1989, observés sur la période 1900-2003, et simulés par le modèle climatique régional de Météo-France sur la période 1960-2100, en suivant les scénarios B2 et A2 à partir de 2000. A noter que le modèle climatique n'étant contraint par aucune observation, il peut reproduire la variabilité du climat observé sur la période 1960-2003, mais pas le détail année après année. (Source IMFREX, 2004)

2003, et un été sur deux serait alors au moins aussi chaud que l'été 2003 comme le montre la Figure 3. Par contre, pour le scénario B2, la température moyenne estivale de 2070-2099 resterait inférieure d'environ 1,5°C à la température de l'été 2003.

En hiver, comme nous l'avons vu, les précipitations moyennes devraient faiblement augmenter. Cependant, les pluies les plus intenses devraient augmenter plus fortement. Par exemple, le nombre de jours avec des précipitations supérieures à 10mm pourrait augmenter pour les scénarios A2 et B2 d'environ 25%. Ici aussi, les disparités régionales sont importantes. Les figures reproduites pour le scénario A2 (Figure 4) avec les deux modèles français, montrent que la fréquence du nombre de jours avec des précipitations supérieures à 20mm, est surtout augmentée dans la partie Ouest et dans la

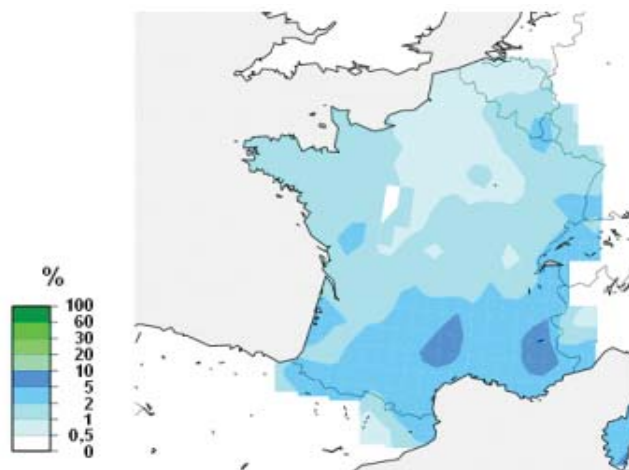


Figure 4-a

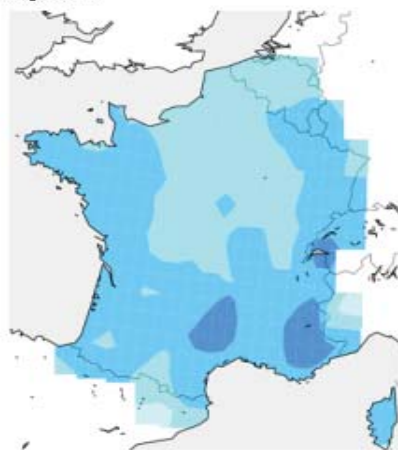


Figure 4-b



Figure 4-c

Figure 4 : Fréquence de jours de pluies intenses en hiver (précipitations supérieures à 20 mm par jour), pour la période 1960-1989 (a) et simulées pour la période 2070-2099 par les modèles climatiques régionaux de Météo-France (b) et de l'IPSL (c) suivant le scénario A2. (Source IMFREX, 2004)

partie Nord du pays.

Il faut cependant préciser ici que, compte tenu de la résolution spatiale des modèles climatiques régionaux évoquée dans l'introduction, les phénomènes de pluies intenses reproduits par le modèle sont de relativement grandes dimensions spatiales. Il n'est de ce fait pas possible de tirer de conclusions

concernant la fréquence d'occurrence des épisodes de pluies diluviennes dans le sud-est de la France. Ces phénomènes, qui se produisent plus fréquemment en automne, sont en effet d'origine convective et fortement dépendants du relief. Cela les rend très variables localement et donc très difficiles à modéliser aux échelles de temps climatiques.

En été, le risque de sécheresse devrait s'accroître et la différence d'un scénario à l'autre redevient importante. Une façon de le caractériser consiste à définir la durée moyenne de la période de sécheresse estivale la plus longue (avec des précipitations inférieures au millimètre par jour). Pour la période 1960-1989 et en moyenne sur la France, cette durée est légèrement supérieure à 20 jours. Suivant le scénario B2, elle serait typiquement augmentée de 4 jours à la fin de ce siècle, mais elle augmenterait de 9 jours suivant le scénario A2.

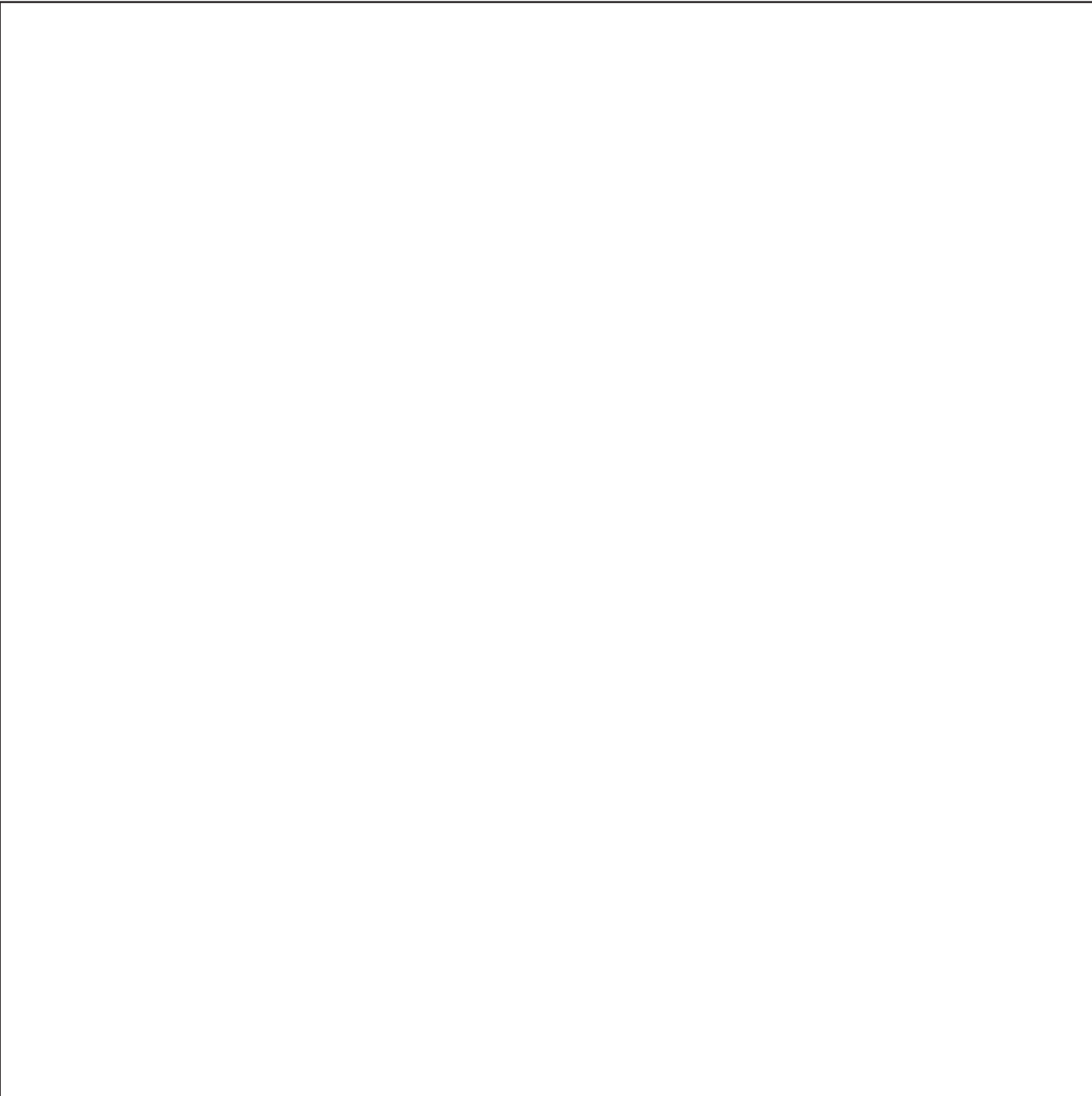
Enfin, concernant le risque de tempête, les simulations actuelles ne permettent pas de mettre en évidence une variation significative du nombre ou de l'intensité des événements. Il est vrai par contre que les modèles simulent pour le futur une augmentation de la fréquence des régimes climatiques favorisant le passage des perturbations sur le Nord de l'Europe. Ce type de situation est connu comme celui de la phase dite positive de l'oscillation Nord-Atlantique. Mais ce résultat, valable pour les très grandes échelles d'espace, ne suffit pas à conclure que les tempêtes associées à de fortes dépressions, parfois de petites dimensions (quelques centaines de kilomètres), vont aussi être affectées dans le même rapport. Une nouvelle étude (IMFREX : IMPacts des changements anthropiques sur la FRéquence des phénomènes EXtrêmes de vent, de température et de précipitations), sur le point de se conclure, devrait permettre d'apporter un nouvel éclairage sur cet aspect particulier du changement climatique, mais aussi, plus généralement, sur l'effet du changement climatique sur les événements extrêmes.

RÉFÉRENCES

- n Déqué M., 2004: *Uncertainties in PRUDENCE simulations : Global high resolution models*. PRUDENCE Technical Report, 58 pp.
- n Dreveton C., L'évolution du nombre de tempêtes en France sur la période 1950-1999, *La Météorologie* - N° 37 - MAI 2002.
- n Frei C, Christensen JH, Déqué M, Jacob D, Jones RG, et P.L. Vidale, 2003 : *Daily precipitation statistics in regional climate models : evaluation and intercomparison for the European Alps*. *J. Geophys. Res.* 108, ACL, 91-19.
- n Gíbelin AL, et M. Déqué, 2003 : *Anthropogenic climate change over the Mediterranean region simulated by a global variable resolution model*. *Climate Dynamics* 20, 327-339.
- n Hagemann, S., B. Machenhauer, R.G. Jones, O.B. Christensen, M. Déqué, D. Jacob, et P.L. Vidale, 2004 : *Evaluation of water and energy budgets in regional climate models applied over Europe*. *Climate Dynamics*, 23, 547-567.
- n IFEN, 2004 : *Inondations récentes : quelques éclairages*. Collection « Les données de l'environnement », 92, 4pp.
- n Moisselin J-M, Schneider M., Canellas C. et Olivier Mestre O., 2002 : *Les changements climatiques en France au XX e siècle Étude des longues séries homogénéisées de données de température et de précipitations*. *La Météorologie* - n° 38 - août 2002
<http://www.smf.asso.fr/Ressources/Moisselin38.pdf>
- n Planton S, et P. Bessemoulin, 2000 : *Le climat s'emballe-t-il ? La Recherche*, N° 335, 46-49.
- n Roux F., 2005: *Les cyclones atlantiques en 2004 : chronique d'une année annoncée*. *La Météorologie* - n° 48 p. 23-27 – Février 2005.
<http://www.smf.asso.fr/Ressources/Roux48%20.pdf>

Pour en savoir plus :

Météo France : www.meteo.fr - CNRM : www.cnrm.meteo.fr
 Institut Pierre Simon Laplace : www.ipsl.jussieu.fr
 Projet IMFREX : medias.dsi.cnrs.fr/imfrex/web/index



impacts

2.1 Impacts globaux futurs

A. Barrie Pittock

Barrie Pittock est Membre Honoraire du Marine and Atmospheric Research du Commonwealth Scientific and Industrial Research Organisation. (CSIRO). Il a dirigé le Groupe d'Impact Climatique du CSIRO jusqu'à sa retraite en 1999. Depuis lors il a apporté des contributions majeures en tant que auteur principal au GIEC et a écrit deux livres, un pour l'Australian Greenhouse Office Climate Change: An Australian Guide to the Science and Potential Impacts, 2003, et l'autre Climate Change: Turning Up the Heat, CSIRO Publications and Earthscan, 2005.

MESSAGES CLÉS

- Les impacts globaux du changement climatique anthropogénique¹ comprennent des effets néfastes sur les écosystèmes naturels; des dommages liés aux événements climatiques extrêmes sur la santé, les biens et l'environnement; l'inéquité croissante entre pays en voie de développement et pays développés; les effets défavorables sur la plupart des personnes même lors de faibles réchauffements globaux, et le danger de futurs changements à grande échelle du système climatique qui pourraient être désastreux pour la civilisation.
- Les impacts s'aggraveront progressivement avec le temps et la poursuite de taux élevés d'émission des gaz à effet de serre.
- Les impacts sur l'Europe se font déjà ressentir; ils comprennent l'aridité croissante au sud, des inondations plus

graves dans le Nord, la fonte du permafrost, et des vagues de chaleur largement répandues. L'affaiblissement de la circulation thermohaline² de l'Atlantique Nord pourrait causer des changements majeurs au climat européen.

- Les réchauffements globaux projetés à 2100 présentent une faible probabilité d'excéder 2°C dans le cas d'une stabilisation à 450 ppm de CO₂, et excéderont presque certainement 2°C pour une stabilisation à 1000 ppm.
- Plusieurs développements récents indiquent un réchauffement probablement plus rapide que celui présenté dans le rapport de 2001 du GIEC.
- Etant données les incertitudes admises, il est important qu'une approche de type "gestion du risque" soit appliquée, de manière à réduire au minimum la probabilité d'occurrences de réalisations extrêmes.

¹Induit par les émissions de gaz à effet de serre dues à l'activité humaine par opposition à un changement climatique « naturel » causé par des fluctuations naturelles du climat (NDT).

²Circulation océanique de grande échelle contrôlée par la température et la salinité de l'eau de mer (NDT)



Cet article dresse le tableau global des impacts potentiels du changement climatique, avec un point mineur sur l'Europe. Il s'appuie sur la littérature scientifique jusqu'en septembre 2005, et particulièrement sur mon livre *Climate Change: Turning Up the Heat* (Earthscan and CSIRO, 2005), qui fournit de plus amples informations et justifications. Les points de vue exprimés sont les miens et ne reflètent pas nécessairement ceux de CSIRO ou du GIEC.

INTRODUCTION

Des incertitudes majeures pèsent sur l'évaluation des impacts probables du changement climatique au cours du 21^{ème} siècle et au-delà. Selon le Troisième Rapport du GIEC, les incertitudes sur les projections des changements de température, globale et régionales, à l'horizon 2100, sont dues pour moitié aux incertitudes scientifiques de l'impact des émissions mêmes et pour moitié aux incertitudes du comportement humain et du développement technologique, qui déterminent

les niveaux d'émissions futures (voir articles de P. Criqui et H. Le Treut, NDL). Cela demande une approche de type "gestion du risque", c'est à dire que l'on considère le risque, qui est le produit de la probabilité d'occurrence d'un impact et de son amplitude ou de sa sévérité.

Impact sur les côtes: risques élevés d'inondations causées par l'élévation du niveau de la mer et les tempêtes pour des dizaines de millions de gens vivant sur de petites îles ou dans des basses côtes

L'estimation du risque passe par la prise en compte de la gamme complète des événements possibles, c'est-à-dire aussi bien des valeurs hautes que des valeurs basses de la distribution de probabilités. Les sceptiques, ou ceux qui récusent le changement climatique en cours ont tendance à mettre l'accent sur les impacts négatifs mineurs, sur l'incertitude de leur occurrence, et à ignorer les impacts majeurs qui pourraient également survenir. La gestion du risque, qui est liée à l'établissement d'une politique, consiste à minimiser, dans la mesure du possible, la probabilité d'événements négatifs importants. Les événements de faible probabilité mais à impact élevé doivent donc être examinés. Comme nous le verrons, les récentes avancées scientifiques, à la fois sur le plan théorique et des observations, indiquent une plus grande probabilité d'occurrence de quelques-uns des impacts les plus graves.

RÉSUMÉ DES CHANGEMENTS GLOBAUX

Les impacts du changement climatique ont été étudiés par des centaines de groupes de recherche dans des secteurs comme l'agriculture, les ressources en eau et la protection des côtes. Leurs travaux montrent que le changement climatique et l'élévation du niveau de la mer, aux amplitudes et vitesses qui sont projetées, impacteraient gravement plusieurs systèmes humains et naturels (GIEC, 2001), comme par exemple:

- Systèmes naturels: changements dans la productivité et la biodiversité, avec un taux accru d'extinctions.
- Cultures: diminution des récoltes dans la plupart de pays tropicaux et subtropicaux, et dans les pays tempérés dans le cas de réchauffements importants.
- Eau: diminution des ressources dans les régions pauvres en eau.
- Economie: dans beaucoup de pays en voie de développement des effets négatifs même avec des réchauffements modérés; dans les pays développés des effets négatifs dans le cas de réchauffements importants.
- Impact sur les côtes: risques élevés d'inondations causées par l'élévation du niveau de la mer et les tempêtes pour des dizaines de millions de gens vivant sur de petites îles ou dans des basses côtes
- Santé: augmentation du stress lié à la chaleur, diffusion de maladies tropicales, décès et blessures liés aux événements extrêmes.
- Équité: les pays pauvres et les pauvres au sein des pays riches sont affectés négativement
- Changements de grande échelle, soudains et irréversibles

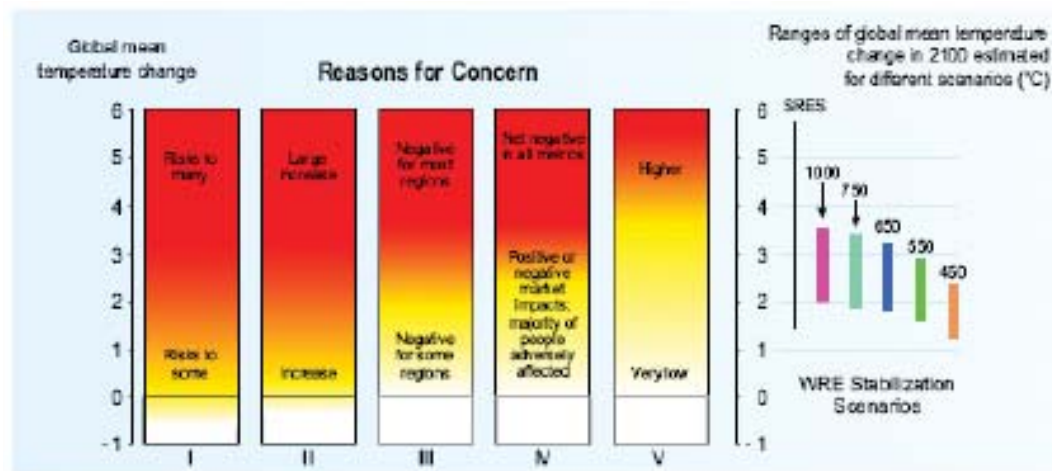


Figure 1 : Les cinq sujets de pré-occupation (à gauche), avec les fourchettes de réchauffement des scénarios SRES et WRE (à droite). Source figure 6-3 du rapport de synthèse du GIEC 2001 (avec autorisation). Notez que des résultats récents concernant la sensibilité climatique et d'autres facteurs (voir texte) impliquent que les bornes supérieures des réchauffements des scénarios WRE pourraient être sous-estimées.

du système climatique: leur probabilité est augmentée, même si leur déclenchement peut être retardé, ils semblent inévitables. Les études ont été fondées en partie sur les observations des variations climatiques passées et leurs effets sur les récoltes, les débits des fleuves, les inondations, les sécheresses, etc. Des extrapolations de l'expérience antérieure et des modèles mathématiques du comportement connu des systèmes ont été employées pour estimer les effets futurs. Par exemple, pour prévoir les rendements des récoltes, on utilise des modèles de productivité qui simulent la croissance des plantes et le développement des fruits ou des grains, en tenant compte de l'humidité de sol, de la température, des engrais et du CO₂ atmosphérique. De même, les modèles déterministes peuvent prévoir les débits des fleuves en calculant la quantité de pluie tombée dans un bassin versant, l'évaporation, la pénétration dans le sol et le ruissellement.

Le rapport GIEC (2001) a classifié ces nombreux résultats

en cinq sujets majeurs de préoccupation:

1. risques pour les systèmes uniques et menacés (extinctions, perte d'habitat, mort des coraux, etc...),
2. risques liés aux événements climatiques extrêmes (impact de l'augmentation des événements extrêmes sur la santé, les biens et l'environnement),
3. distribution des impacts (des pertes généralement plus extrêmes ou survenant plus tôt dans les pays pauvres en voie de développement que dans les riches pays développés)
4. impacts globaux (les impacts nets globaux estimés sur le secteur du marché sont légèrement positifs ou négatifs pour des réchauffements modérés, mais de plus en plus négatifs dans le cas de réchauffements importants; plus de personnes affectées négativement, même dans le cas de faible réchauffements), et
5. risques de discontinuités futures de grande échelle (ces événements à haut impact, voir ci-dessous, deviennent de

plus en plus probables avec des réchauffements plus importants et plus rapides).

Il y a beaucoup de lacunes dans les études, particulièrement au niveau des impacts potentiels liés aux modifications des événements extrêmes, qui pourraient dominer l'ensemble des impacts. La [figure 1](#) montre schématiquement ces résultats, avec sur la gauche les barres verticales représentant les cinq catégories de risque, chacune devenant plus grave pour des réchauffements globaux plus importants, et sur la droite la gamme des réchauffements à l'horizon 2100 pour chacun des scénarios WRE de stabilisation (voir ci-dessous).

Quelques exemples-clé des discontinuités de grande échelle sont montrés dans le [tableau 1](#). Celles-ci sont probables dans le cas d'un réchauffement global dépassant les 2 à 3°C, et pourraient même être déclenchés ou devenir inévitables suite à des réchauffements plus faibles, bien que le seuil exact de ces effets soit incertain. Leurs conséquences sont susceptibles de dépasser toutes les analyses classiques de type coût bénéfices.

Les impacts dépendront non seulement de l'amplitude et du taux de changement climatique, mais également de la capacité de la communauté impactée à faire face ou s'adapter aux

Table 1. Discontinuités potentielles grande échelle du système climatique. Source GIEC (2001), Table 19-6.

Type d'événement	Cause	Impact potentiel
Change ments maje urs dans la circulation océanique	Change ment de salinité et de température induisent un changement de la stabilité et de la circulation méridienne globale	Réduction du transport de chaleur vers le nord dans l'Atlantique Nord, El Nino et les courants océaniques régionaux pourraient changer
Fonte du Groenland et désintégration de la calotte glaciaire dans l'Antarctique Ouest	Fonte de surface, eau de fonte, disparition de la glace de mer accélère l'écoulement	Elévation rapide et irréversible du niveau de la mer jusqu'à plusieurs mètres en quelques siècles
Accélération des émissions de gaz à effet de serre conduisent à un réchauffement plus rapide	Les fore ts et la toundra deviennent des sources de CO ₂ et de méthane, instabilité des hydrates de méthane des sédiments marins	Des impact plus rapides et plus graves rendent l'adaptation plus difficile et les impacts plus graves.

Table 2. Comparaison des impacts attendus pour des niveaux de stabilisation des concentrations atmosphériques à 550 et 750 ppm en équivalent de CO2 avec des impacts pour des émissions non atténuées. A partir de Arnell et al. (2002).

Impacts	Emissions non atténuées	Stabilisation à 750 ppm (d'ici 2250)	Stabilisation à 550 ppm (d'ici 2150)
Retardement du réchauffement de 2050 par rapport au cas sans atténuation	--	50 ans	100 ans
Pertes des forêts tropicales et des prairies	2050	2100	Pas de pertes
Modification de la biosphère de puits de carbone en sources de carbone	2050	2170	Equilibre d'ici 2170 (ni puits ni source)
Personnes inondées par de tempêtes en 2080	94 millions	35 millions	18 millions
Pertes de terres humides côtières d'ici 2080	12%	8%	6%
Personnes exposées à des manques d'eau en 2080	2.8 to 3.4 milliards	2.9 milliards	0.7 milliards
Augmentation de la population exposée au Malaria	257 à 323 millions	174 millions	253 millions
Augmentation de la population exposée à la famine en 2080	69 to 91 millions	16 millions	43 millions

changements, et donc de l'état du système socio-économique au moment des impacts. Comme nous l'avons vu récemment avec l'ouragan Katrina aux Etats-Unis, la capacité à s'adapter ou à faire face dépend de nombreux facteurs, parmi les-

quels l'efficacité et la confiance en des systèmes d'alerte, la volonté d'investir pour se doter de meilleurs moyens de réponse et pour pallier aux inégalités sociales au sein de la population affectée.

Une étude anglaise (Arnell et al., 2002) a essayé d'estimer les conséquences d'une stabilisation des concentrations de gaz à effet de serre à diverses concentrations, par rapport à des émissions non contraintes par des mesures d'atténuation (Tableau 2). Toutefois, cette étude n'étant fondée que sur un seul modèle climatique, une simulation unique de chaque scénario de stabilisation, un seul futur socio-économique, et possédant d'autres lacunes, ses résultats sont indicatifs. Les auteurs ont conclu que, tandis que les mesures d'atténuation permettent d'éviter de nombreux impacts, la stabilisation à 550 ppm semble nécessaire afin d'éviter ou réduire de manière significative la plupart des impacts projetés dans le cas d'émissions non contraintes. Voir également Parry et al. (2004), où des simulations multiples ont été employées pour étudier des impacts liés aux scénarios du RSSE.

Les résultats pour les populations en danger de malaria et de famine sont quelque peu contre intuitifs. Ils présentent moins de personnes en danger pour une stabilisation à 750 ppm qu'à 550 ppm. Ceci peut être dû, en grande partie, aux incertitudes dans les changements estimés des précipitations à l'échelle régionale, puisque dans les deux cas les résultats sont très sensibles aux variations régionales des précipitations des pays en voie de développement. Les simulations uniques de chaque scénario de stabilisation montrent de grandes variations inter-décennales dans les précipitations, ce qui peut être comparable aux effets du changement climatique même. Idéalement, de meilleures évaluations seraient possibles avec des simulations multiples, de sorte à dégager des résultats probabilistes.

QUELQUES PRÉOCCUPATIONS POUR L'EUROPE

La littérature présente dans GIEC (2001) et mise à jour ici, indique un certain nombre de vulnérabilités clés en Europe. Celles-ci incluent :

- Aridité croissante dans la région méditerranéenne. C'est l'un des résultats les plus clairs des modèles climatiques globaux, résultat qui pourrait être déjà visible.
- Des vagues de chaleur plus graves, comme celle de Juillet-Août 2003 qui a causé environ une surmortalité de 15 000 décès seulement en France (Beniston et Diaz, 2004 ; Schar et al. 2004 ; Stott et al, 2004). La combinaison de l'aridité accrue et des vagues de chaleur est susceptible de causer des feux de forêt à la fois plus fréquents et plus graves.
- Augmentation des inondations soudaines en raison de précipitations plus intenses dans les régions escarpées et à développement dense.
- Augmentations des inondations majeures en Europe du nord, en raison de précipitations plus intenses et accrues et de l'avancement de la fonte des neiges.
- Changements possibles dans la fréquence de tempêtes, y compris vents et grêles extrêmes (Fountain et autres, 2005)
- Dégel du permafrost dans le nord et les régions alpines (où il augmenterait le risque de glissements de terrain) (Nelson et autres, 2001 ; Le Nelson, 2003).
- Disparition des terres humides côtières en raison de l'élévation de niveau de la mer, particulièrement dans les secteurs où l'élévation locale de niveau de la mer se produit déjà, parfois accentué par le retrait des eaux souterraines.
- Affaiblissement ou cessation de la circulation thermohaline en Atlantique Nord (actuellement contrôlée par la plongée d'eau salée froide qui devrait devenir plus chaude et

moins salée) (National Research Concil, 2002 ; Alley et al, 2003). Cette circulation transporte beaucoup de chaleur de l'Océan atlantique tropical vers le nord-ouest de l'Europe. Si cet affaiblissement se produit rapidement dans les décennies à venir, ce qui n'est pas probable mais possible, il pourrait conduire à un net refroidissement (Gagosian, 2004; Stocker and Raible, 2005).

- Tensions causées par l’augmentation des mouvements de population, y compris en provenance de pays voisins moins développés.
- Augmentation des menaces à la paix et la stabilité, principalement au sein de pays voisins, à cause de conflits pour l'eau et d'autres ressources.

RELIER LES IMPACTS AUX SCÉNARIOS ET OBJECTIFS D'ÉMISSION

Le tableau 3 montre les valeurs projetées des réchauffements moyens globaux selon les scénarios d'émissions de gaz à effet de serre du RSSE du GIEC (voir article de P. Criqui). Ces scénarios sont présentés comme tous également réalistes mais, de manière délibérée, n’incluent pas les mesures de réduction des émissions destinées à stabiliser les concentrations atmosphériques de GES. Ce Tableau montre aussi les scénarios WRE, développés par Wigley, Richel et Edmonds (1996). Ce sont des scénarios cherchant à stabiliser la concentration en équivalent carbone des GES à des niveaux prédéterminés (entre 450 et 1000 ppm) (Figure 1). Ces valeurs sont fondées sur la gamme de sensibilité climatique³

³ La sensibilité climatique est le réchauffement à l'équilibre (après ajustement du climat) pour un doublement de la concentration atmosphérique de CO2 par rapport a la valeur préindustrielle (de 280 à 560 ppm).

Scénario	réchauffement (°C) en 2100	en 2350	à l'équilibre
RSSE B1	1.4-2.6	-	-
RSSE B2	1.9-3.5	-	-
RSSE A1T	1.8-3.3	-	-
RSSE A2	2.8-4.8	-	-
RSSE A1F1	3.2-5.8	-	-
WRE 450	1.2-2.3	1.4-3.0	1.5-3.9
WRE 550	1.6-2.9	1.9-4.0	1.9-5.2
WRE 650	1.8-3.2	2.2-4.7	2.3-6.3
WRE 750	1.9-3.4	2.6-5.4	2.7-7.1
WRE 1000	2.0-3.5	3.2-6.6	3.5-8.7

Table 3. Projections de réchauffement pour différents scénarios d'émissions. D'après les résultats du rapport de synthèse du GIEC (2001).

supposée par le GIEC, soit de 1.5 à 4.5°C de réchauffement moyen global.

Le plus bas des scénarios du RSSE, B1 (technologies propres et utilisation efficace des ressources), projette un réchauffement à 2100 qui pourrait être aussi bas que 1.4°C, mais aussi haut que 2.6°C, alors que le plus élevé scénario plausible du RSSE, A1FI (intensif en combustibles fossiles), projette une gamme de valeurs allant de 3.2 à 4.8°C, donc sans aucun recouvrement avec le scénario plus bas. Quelques critiques ont attaqué la réalité de ces scénarios sur des terrains à mon avis assez douteux, mais cela n'a aucune importance; ce qui compte, ce sont les scénarios incluant les mesures d'atténuation des émissions. Plus important encore, le scénario de WRE 450 (450 ppm) donne une gamme de réchauffement à 2100 de 1.2 à 2.3°C, et le scénario de WRE 1000 (le plus élevé, 1000 ppm) donne 2.0 à 3.5°C. Ceci montre que, avec la gamme projetée de sensibilité climatique, et afin d'éviter un réchauffement de plus de 2°C en 2100, l'objectif de stabilisation se situe à 450 ppm, et même dans ce cas il subsiste une faible possibilité que le réchauffement puisse dépasser cette valeur.

PRÉOCCUPATIONS RÉCENTES

Les avancées qui indiquent une probabilité élevée d'impacts graves mentionnent :

- Des estimations plus élevées de la gamme de sensibilité climatique (2.4 à 5.4°C selon Murphy et al, 2004, et 2 à 11°C selon Stainforth et al, 2005).
- L'"obscurcissement global" montre des signes d'inversion

lorsque les émissions de particules sont maîtrisées (Cohen et al, 2004 ; Philipona et Durr, 2004 ; Alpert et al, 2005), de ce fait enlevant l'effet de refroidissement lié aux aérosols.

- L'observation d'un dégel rapide du permafrost (Arctic Climate Impact Assessment, 2004; Nelson 2003), le sol et la végétation agissant en tant que sources plutôt que puits de gaz à effet de serre (Bellamy et al, 2005 ; Ciais et al, 2005), conduisant à une rétroaction positive précoce sur le cycle de carbone (Francey, 2005).
- La récession rapide de la glace de mer arctique, conduisant de nouveau à une rétroaction positive précoce, étant donné que la réduction de l'albedo accentue le réchauffement global (Gregory et al, 2002 ; Comiso et Parkinson, 2004 ; NASA, 2005).
- La désintégration rapide des plateaux de glace (glace de mer) autour de la Péninsule Antarctique et la fonte des bords de la calotte glaciaire du Groenland, soulignent le rôle des plateaux de glace sur le retardement de l'écoulement des glaciers, et le rôle des eaux de fonte de surface dans l'accélération de l'écoulement des glaciers et de la désintégration des plateaux de glace (Scambos et al., 2000; Thomas et al., 2004; Cook et al., 2005).
- Les observations qui indiquent une intensification plus rapide des cyclones tropicaux (Emanuel, 2005 ; Trenberth, 2005 ; Webster et al, 2005).

Les quatre premiers points suggèrent que des niveaux critiques du réchauffement global puissent se produire à des concentrations en gaz à effet de serre et/ou en émissions anthropogéniques encore plus faibles que celles retenues par le rapport du GIEC 2001. Ils augmentent l'urgence de l'ac-

tion de réduction des émissions, si nous voulons éviter des niveaux dangereux de changement climatique. Le cinquième point suggère une élévation plus rapide du niveau de la mer.

De tels développements suggèrent également que, jusqu'à présent, de nombreux scientifiques aient atténué les possibilités les plus extrêmes situés aux bornes de la gamme d'incer-

titude, peut-être parce qu'ils ont eu peur d'irriter les gouvernements, de subir les attaques des opposants, et d'être catégoriser comme alarmistes. Une approche de type "gestion du risque" exige que ces possibilités extrêmes soient prises en considération.

RÉFÉRENCES

- n Alley, R. J. Marotzke, W. D. Nordhaus, J. T. Overpeck, D. M. Peteet, R. A. Pielke Jr., R. T. Pierrehumbert, P. B. Rhines, T. F. Stocker, L. D. Talley, and J. M. Wallace, 2003, *Abrupt climate change*, *Science*, **299**, 2005-2010.
- n Alpert, P., P. Kishcha, Y.F. Kaufman and R. Schwarzbard, 2005, *Global dimming or local dimming?, effect of urbanization on sunlight availability*, *Geophysical Research Letters*, **32**, L17802.
- n Arnell, N. W., M. G. R. Cannell, M. Hulme, R. S. Kovats, J. F. B. Mitchell, R. J. Nicholls, M. L. Parry, M. T. J. Livermore, and A. White, 2002, *The Consequences of CO2 Stabilisation for the Impacts of Climate Change*, *Climatic Change*, **53**, 413-446.
- n Arctic Climate Impact Assessment, 2004, *Impacts of a Warming Arctic*, Cambridge University Press, Cambridge UK, <http://www.acia.uaf.edu>.
- n Bellamy, P.H., P.J. Loveland, R.I. Bradley, R.M. Lark and G.J.D. Kirk, 2005, *Carbon losses from all soils across England and Wales 1978-2003*, *Nature*, **437**, 245-248.
- n Beniston and Diaz, 2004, *The 2003 heat wave as an example of summers in a greenhouse climate? Observations and climate model simulations for Basel, Switzerland*, *Global and Planetary Change*, **44**, 73-81.
- n Ciais, P. M. Reichstein, and 31 others, 2005, *Europe-wide reduction in primary productivity caused by the heat and drought in 2003*, *Nature*, **437**, 529-533.
- n Cohen, S., B. Liepert and G. Stanhill, 2004, *Global Dimming comes of age*, *EOS, Trans, AGU*, **85**, 363-363.
- n Comiso, J.C. and C.L. Parkinson, 2004, *Satellite-observed changes in the Arctic*, *Physics Today*, August 2004, 38-44.
- n Cook, A.J., A.J. Fox, D.G. Vaughan and J.G. Ferrigno, 2005, *Retreating glacier fronts on the Antarctic Peninsula over the past half-century*, *Science*, **308**, 541-547.
- n Emanuel, K, 2005, *Increasing destructiveness of tropical cyclones over the past 30 years*, *Nature*, **436**, 686-688.
- n Fountain, A.G., Jacobel, R.W., R. Schlechting and P. Janssen, 2005, *Fractures as the main pathways of water flow in temperate glaciers*, *Nature*, **433**, 618-621.
- n Francey, R.J., 2005, *Recent record growth in atmospheric CO2 levels*, *Environmental Chemistry*, **2**, 3-5.
- n Gagosian, R.B., 2003, *Abrupt climate change: should we be worried?, brochure*, Woods Hole Institution of Oceanography, see www.whoi.edu/institutes/occi/currenttopics/climatechange_wef.html.
- n Gregory, J.M., P.A. Stott, D.J. Cresswell, N.A. Rayner, C. Gordon and D.M.H. Sexton, 2002, *Recent and future changes in Arctic sea ice simulated by the HadCM3 AOGCM*, *Geophysical Research Letters*, **29** (24), 2175, doi:10.1029/2001GL014575.
- n IPCC, 2000, *Special Report on Emission Scenarios, 2000: A special report of Working Group III of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, Cambridge University Press, 599 pp.

n IPCC, 2001, *Climate Change 2001: Impacts, Adaptation and Vulnerability: Contribution of Working Group I to the IPCC Third Assessment Report*, Cambridge University Press, 1032 pp.. See www.ipcc.ch.

n IPCC Synthesis Report, 2001, *Climate Change 2001: Synthesis Report, Contribution of Working Groups I, II and III to the IPCC Third Assessment Report*, Cambridge University Press, 397 pp.. See www.ipcc.ch.

n Murphy, J.M., D.M.H. Sexton, D.N. Barnett, G.S. Jones, M.J. Webb, M. Collins and D.A. Stainforth, 2004, *Quantification of modelling uncertainties in a large ensemble of climate change simulations*, *Nature*, 430, 768-772.

n NASA, 2005, *Satellites continue to see decline in Arctic sea ice in 2005*, *NASA news release*, 28 September 2005, at <http://www.nasa.gov/centers/goddard/news>.

n National Research Council, 2002, *Abrupt Climate Change: Inevitable Surprises*, NRC, Washington DC. See <http://books.nap.edu/books/>

n Nelson, F.E., 2003, (Un)frozen in time, *Science*, 299, 1673-1675.
Nelson, F.E., O.A. Anisimov and N.I. Shiklomanov, 2001, *Subsidence risk from thawing permafrost*, *Nature*, 410, 889-890.

n Parry, M. and others, 2004, *Global impacts of climate change under the SRES scenarios*, *Special Issue of Global Environmental Change*, 14, issue 1, 1-99.

n Philipona, R. and B. Durr, 2004, *Greenhouse forcing outweighs decreasing solar radiation driving rapid temperature rise over land*, *Geophysical Research Letters*, 31, L22208, doi:10.1029/2004GL020937.

n Scambos, T.A., C. Hulbe, M. Fahnestock and J. Bohlander, 2000, *The link between climate warming and break-up of ice shelves in the Antarctic Peninsula*, *Journal of Glaciology*, 46, 516-530.

n Schar, C., P.L. Vidale, D. Luthi, C. Frei, C. Haberli, M.A. Liniger and C. Appenzeller, 2004, *The role of increasing temperature variability in European summer heatwaves*, *Nature*, 427, 332-336.

n Stainforth, D.A., T. Aina, C. Christensen, M. Collins, N. Faull, D.J. Frame, J.A. Kettleborough, S. Knight, A. Martin, J.M. Murphy, C. Pianì, D. Sexton, L.A. Smith, R.A. Spicer, A.J. Thorpe and M.R. Allen, 2005, *Uncertainty in predictions of the climate response to rising levels of greenhouse gases*, *Nature*, 27 January

n Stocker, T.F. and C.C. Raible, 2005, *Water cycle shifts gear*, *Nature*, 434, 830-832.

n Stott, P.A., D.A. Stone and M.R. Allen, 2004, *Human contribution to the European heatwave of 2003*, *Nature*, 432, 610-614.

n Thomas, R., E. Rignot and 16 others, 2004, *Accelerated sea-level rise from West Antarctica*, *Science*, 306, 255-258.

n Trenberth, K., 2005, *Uncertainty in hurricanes and global warming*, *Science*, 308, 1753-1754.

n Webster, P.J., G.J. Holland, J.A. Curry and H.-R. Chang, 2005, *Changes in tropical cyclone number, duration, and intensity in a warming environment*, *Science*, 309, 1844-1846.

n Wigley, T.M.L., R. Richel and J.A. Edmonds, 1996, *Economic and environmental choices in the stabilization of atmospheric CO2 concentrations*, *Nature*, 379, 242-245.

Pour en savoir plus :

Agence Européenne pour l'Environnement : www.eea.eu.int
GIEC : www.ipcc.ch

TEXTE ORIGINAL

Global impacts in the 21st Century

A. Barrie Pittock - Honorary Fellow, CSIRO Marine and Atmospheric Research

KEY MESSAGES :

- The global impacts of anthropogenic climate change include detrimental effects on natural ecosystems; damages from extreme climatic events to health, property and the environment; increasing inequity between developing and developed countries; most people adversely affected even for small global warmings; and the danger of future large-scale changes to the climate system which could be disastrous to civilisation.
- Impacts will be progressively more serious with time and for continued high rates of emission of greenhouse gases.
- Impacts on Europe are already being felt; including increasing aridity in the south, more severe flooding in the north, melting of permafrost, and widespread heat waves. Weakening of the North Atlantic thermo-haline circulation could cause major changes to European climate.
- Projected global warmings at 2100 have a small chance of exceeding 2°C even for a stabilised CO₂ concentration of 450 ppm, and will almost certainly exceed 2°C for stabilisation at 1000 ppm.
- Several recent developments point to possibly more rapid warming than in the IPCC 2001 report.
- Given the acknowledged uncertainties, it is important that a risk management approach be followed, which seeks to minimise the probability of the more extreme possibilities occurring.

This chapter focuses on the broad global picture of potential impacts of climate change, with a minor focus on Europe. It draws on the scientific literature up until about September 2005, and draws heavily on my book *Climate change : Turning Up the Heat* (Earthscan and CSIRO, 2005), which provides more information and justification.

The views expressed are my own and do not necessarily reflect those of CSIRO or the IPCC

Introduction

There are major uncertainties in assessing the likely impacts of climate change in the 21st century and beyond. According to the IPCC Third Assessment Report, contributions to the uncertainty in projections of global and regional temperature changes in the year 2100 arise roughly equally from scientific uncertainties in the impacts of particular emissions scenarios, and from uncertainties in human behaviour and technological development which determine the future emissions. This requires that we take a

risk management approach, that is, that we consider the risk, which is a product of the probability of occurrence of any impact and the magnitude or severity of that impact.

In considering risk we must look at both the low and the high side of the probability distribution or range, unlike the so-called sceptics or “contrarians”. Contrarians tend to emphasise the smallest adverse impacts consistent with the uncertainty range, but to ignore the large impacts that might equally probably occur. Risk management, which is relevant to policy, is about minimising as far as possible the probability of large adverse impacts. Therefore low probability high impact possibilities must be examined. As we shall see, recent scientific developments, both theoretical and observational, point to a greater probability of some of the more serious impacts occurring.

Summary of Global Impacts

Impacts of climate changes have been studied by hundreds of research groups from sectors such as agriculture, water supply and coastal protection. These groups have found that climate change and sea-level rise of the projected magnitude and rates would seriously affect many natural and human systems (IPCC, 2001), for example:

- Natural systems: Changes in productivity and biodiversity, with an increased rate of extinctions.
- Crops: Decreases in yields in most tropical and sub-tropical countries, and in temperate countries for large warmings.
- Water: Increased shortages in many water-scarce regions.
- Economies: Adverse effects in many developing countries for even small warmings, and for developed countries for larger warmings.
- Coastal impacts: Tens of millions of people on small islands and low-lying coastal areas at severe risk of flooding from sea-level rise and storm surges.
- Human health: Increased heat stress, tropical diseases spread, deaths and injuries from climatic extremes.
- Equity: Poor countries, and poor within rich countries more adversely affected.
- Large-scale, abrupt and irreversible climate system changes. These increase in probability although their onset may be delayed, but become inevitable.

Studies have been based in part on observations of past variations in climate and their effects on crop yields, river flow, floods, droughts and so on. Extrapolations from past experience and mathematical models of known behaviour of systems have been used to estimate future effects. For example, crop productivity models that simulate how plants grow and develop fruit or grain, that take into account soil moisture, temperature, soil nutrients and carbon dioxide in the air, are used to predict crop yields. Similarly, causal models can predict river flows by calculating how much rain falls in a river catchment, how much evaporates, how much penetrates into the soil and how much runs off.

The IPCC (2001) report classified these many results into five main reasons for concern:

1. risks to unique and threatened systems (extinctions, loss of habitat, death of corals, etc.);
2. risks from extreme climatic events (health, property and environmental impacts from increases in extreme events);

3. distribution of impacts (generally more extreme or earlier losses in poor developing countries than in rich developed countries);
4. aggregate impacts (estimated global net market sector impacts are small positive or negative for small warmings, but increasingly negative for larger warmings; more people adversely affected, even for small warmings), and
5. risks from future large-scale discontinuities (these high impact events, see below, become increasingly likely with larger and faster warmings).

There are many gaps in the studies, especially in regard to the potential impacts of changes in extreme events, which may dominate the total impacts. Figure 1 shows these results schematically, with at left the vertical bars representing the five reasons for concern, each getting more serious for greater global warmings, and at the right the range of warmings at 2100 for each of the WRE stabilisation scenarios (see below).

Some key examples of large-scale discontinuities are shown in Table 1. These are likely to occur as a result of global warming in excess of 2 to 3°C, and may be triggered or made inevitable at even lower warmings, although the exact threshold for these effects is uncertain. They may dominate any cost/benefit analysis.

Impacts will depend not only on the magnitude and rate of climate change, but also on the capacity of the impacted community to cope or adapt to the changes, and thus on the state of the socio-economic system at the time of the impacts. As we have seen recently with hurricane Katrina in the US, capacity to adapt or cope is dependent on many factors including the effectiveness of and belief in early warning systems, readiness to spend money on increasing coping capacity, and on the inequities in the affected society.

A UK study (Arnell et al., 2002) attempted to quantify the effects of stabilising greenhouse gas concentrations at various concentrations, relative to unmitigated emissions. Some results are summarised in Table 2. However, as this study used only one climate model, single simulations of each stabilisation scenario climate, a single socio-economic future, and had other caveats, its results are only a first estimate. The authors concluded that while this study shows that mitigation avoids many impacts, stabilisation at 550 ppm appears necessary to avoid or significantly reduce most of the projected impacts in the unmitigated case. See also Parry et al. (2004), where multiple simulations were used to study impacts for the various

SRES scenarios.

Results shown for populations at risk from malaria and hunger are somewhat counter-intuitive, with less apparently at risk for stabilisation at 750 ppm than at 550 ppm. This may be largely due to uncertainties in the estimated regional changes in rainfall, since in both cases results are very sensitive to regional rainfall variations in developing countries. The single climate model simulations for each stabilisation scenario show large inter-decadal variations in precipitation, which may be comparable with the effects of climate change. Ideally, better estimates would be possible if multiple simulations were carried out so that ensemble averages could be used.

Some Concerns for Europe

The literature as reported in IPCC (2001) and updated here, reveals a number of key vulnerabilities in the European region. These include:

- Increasing aridity in the Mediterranean region. This is one of the clearest results from global climate models and may be evident already.
- More severe heat waves, such as that in July-August 2003 that caused some 15,000 excess deaths in France alone (Beniston and Diaz, 2004; Schar et al., 2004; Stott et al., 2004). The combination of increased aridity and heat waves is likely to lead to more frequent and severe wildfires.
- Increased flash flooding due to more intense rainfall in regions of steep topography and dense development.
- Increases in major floods in northern Europe due to more intense and increased rainfall and earlier snowmelt.
- Possible changes in storminess, including extreme winds and hail (Fountain et al., 2005)
- Thawing of permafrost in the north and in Alpine regions (where it would increase the risk of landslides) (Nelson et al., 2001; Nelson, 2003).
- Loss of coastal wetlands due to sea-level rise, especially in areas where local sea-level rise is already occurring, sometimes made worse by withdrawal of groundwater.
- Weakening or cessation of the North Atlantic thermo-haline circulation (presently driven by sinking of cold saline water which is expected to get warmer and fresher) (National Research Council, 2002; Alley et al., 2003). This circulation conveys much heat from the tropical Atlantic to north-western Europe. If this weakening occurs rapidly in the next few decades, which is not likely but possible, it could lead to net cooling (Gagosian, 2004; Stocker and Raible, 2005).

- Pressures for increased population movements, including from neighbouring less-developed countries.
- Increased threats to peace and stability, again mainly in neighbouring countries and over water and other resources.

Relating Impacts to Emissions Scenarios and Targets

Table 3 shows the projected ranges of global average warmings for the SRES range of greenhouse gas emissions scenarios developed by IPCC as plausible but not policy-driven. Also shown are the WRE scenarios, developed by Wigley, Richel and Edmonds (1996). These are scenarios seeking to stabilise equivalent carbon dioxide concentrations at the numbers given (ranging from 450 to 1000 parts per million), and are also shown in Figure 1 above. These numbers are based on the climate sensitivity range assumed by IPCC of 1.5 to 4.5°C global average warming. Climate sensitivity is the warming at equilibrium (after the climate has fully adjusted) for a doubling of carbon dioxide concentration.

The lowest of the SRES scenarios, B1 (clean and resource-efficient technologies), gives a warming at 2100 which could be as low as 1.4°C, but as high as 2.6°C, while the highest plausible SRES scenario, A1FI (fossil-fuel intensive), gives a range of 3.2 to 4.8°C, which does not even overlap with the lowest scenario. Some critics have attacked the reality of these scenarios on what to me are fairly dubious grounds, but in fact it is irrelevant, since it is the policy-relevant scenarios that are important. More importantly, the WRE scenario (450 ppm) gives a warming range at 2100 of 1.2 to 2.3°C, and the highest WRE scenario (1000 ppm) gives 2.0 to 3.5°C. This shows that, with the assumed climate sensitivity range, to avoid a warming in 2100 of greater than 2°C we need to aim at stabilisation at a concentration around 450 ppm, and even then there is a small chance that warming may exceed that figure.

Recent Concerns

Developments pointing to a higher probability of the more serious impacts include:

- Higher estimates of the climate sensitivity range (2.4 to 5.4°C according to Murphy et al., 2004, and 2 to 11°C according to Stainforth et al., 2005).
- “Global dimming” showing signs of reversal as particulate emissions are brought more under control (Cohen et al., 2004; Philipona and Durr, 2004; Alpert et al., 2005) thus removing the cooling effect of aerosols.

- Observations of rapid melting of permafrost (Arctic Climate Impact Assessment, 2004; Nelson 2003), and of soil and vegetation acting as sources rather than sinks of greenhouse gases (Bellamy et al., 2005; Ciais et al., 2005), leading to an earlier than expected positive feedback in the carbon cycle (Francey, 2005).
- Rapid recession of Arctic sea ice, again leading to an early positive feedback as reduced albedo adds to global warming (Gregory et al., 2002; Comiso and Parkinson, 2004; NASA, 2005).
- Rapid disintegration of ice shelves around the Antarctic Peninsula and edge melting of the Greenland Ice Sheet, pointing to the role of ice shelves in retarding glacier outflow, and of surface meltwater in accelerated glacier flow rates and ice shelf disintegration (Scambos et al., 2000; Thomas et al., 2004; Cook et al., 2005).
- Observations pointing to more rapid intensification of tropical cyclones (Emanuel, 2005; Trenberth, 2005; Webster et al., 2005).

The first four of these dot points suggest that critical levels of global warming may occur at even lower greenhouse gas concentrations and/or anthropogenic emissions than was considered justified in the IPCC (2001) report. They increase the urgency of action to reduce emissions if we are to avoid dangerous levels of climate change. The fifth point suggests a more rapid rise in sea level.

Such developments also suggest that up until now many scientists may have downplayed the more extreme possibilities at the high end of the uncertainty range, perhaps because they have been fearful of upsetting governments, of attacks from contrarians, and of being labelled as alarmist. A risk management approach demands that these extreme possibilities be taken into account.

2.2 Impact sur la ressource en eau

Pierre Chevallier - Institut de Recherche pour le Développement
et Institut Languedocien de recherche sur l'Eau et l'Environnement

Pierre Chevallier travaille sur l'impact du changement climatique sur la ressource en eau depuis 1993 au sein de l'unité de recherche Great Ice de l'IRD. Il s'intéresse particulièrement aux milieux de hautes montagnes (Cordillère des Andes, Himalaya). Il est directeur de l'Institut Languedocien de recherche sur l'Eau et l'Environnement et expert auprès du Comité Scientifique du programme national Gestion et Impacts du Changement Climatique (GICC). Il a participé à la Conférence des Parties de la Convention des Nations Unies sur le Changement Climatique (UNCCC) à Bonn en 2004 comme expert invité par la délégation du Pérou. Il doit intervenir comme correcteur du quatrième rapport du GIEC (2007).

MESSAGES CLÉS

- L'impact du changement climatique sur la ressource en eau ne peut pas être facilement isolé, de celui des autres changements affectant le milieu continental, en particulier ceux liés aux activités humaines, sauf dans quelques cas comme celui – spectaculaire et durable – du recul des glaciers et de la diminution de la couverture neigeuse.
- Le changement climatique joue un rôle significatif sur la disponibilité de la ressource en eau. Il faut toutefois rester prudent dans les projections futures, cette disponibilité étant largement dépendante de l'état du milieu récepteur pour lequel on ne peut formuler que des hypothèses.
- Les modélisations récentes sur les trois grands bassins français (Rhône, Seine et Adour-Garonne) indiquent une tendance à un affaiblissement des débits d'étiages estivaux à l'horizon 2100 sous les hypothèses du GIEC. Les résultats obtenus sur la période hivernale ne sont pas significatifs.
- A l'échelle locale et sur des durées courtes (de la journée au mois), les augmentations, mêmes modestes, attendues sur la fréquence et l'intensité de certains événements climatiques (précipitations, températures) peuvent voir

leurs impacts sur la ressource en eau significativement amplifiés lorsqu'elles sont combinées à des situations loca-

les particulières : crue rapide, inondation, sécheresse, pollution, etc.

INTRODUCTION

La gestion de la ressource en eau a été de tout temps une préoccupation majeure des sociétés humaines et les spécialistes de ces questions s'accordent tous à penser qu'elle le restera encore dans un futur qui risque de se prolonger. De grandes rencontres ont été organisées depuis 30 ans à l'échelon des nations et des grands groupes d'intérêts (Mar del Plata, 1976 ; Dublin 1992 ; Marrakech, 1997 ; La Haye, 2000 ; Kyoto, 2003). Des organisations ou des programmes internationaux ont vu le jour (Global Water Partnership, Conseil Mondial de l'Eau, International Water Management Institute, le Programme Hydrologique International, etc.). La question de l'impact du changement climatique sur cette ressource est apparue avec une importance croissante dans ces différentes manifestations, toujours associée à une préoccupation de gestion de la disponibilité.

En effet, les questions liées à la disponibilité de l'eau sont particulièrement délicates là où la ressource est faible ou mal distribuée (bassin méditerranéen, régions de mousson, zones arides et désertiques, etc.), là où les conditions climatiques engendrent des événements catastrophiques, là où les activités humaines (agriculture, industrie, urbanisme, mines, production énergétique, etc.) conduisent à une dégradation rapide et quelquefois irréversible de sa qualité, et, enfin, là où elle fait l'objet de la convoitise d'usagers potentiels aux intérêts contradictoires.

Dans le présent rapport, plusieurs chapitres traitent d'élé-

ments du cycle de l'eau (précipitations, couverture neigeuse, débits des cours d'eau ou de domaines dans lesquels l'eau constitue un élément important (forêt, agriculture, santé, énergie). Il est apparu intéressant de proposer un court chapitre synthétique présentant une vision d'ensemble, avec ses certitudes, mais aussi ses contradictions et ses questionnements.

CHANGEMENT GLOBAL ET CHANGEMENT CLIMATIQUE

La ressource en eau est au cœur des problèmes posés par ce que l'on a coutume d'appeler les changements globaux. On admet souvent pour simplifier que cette notion recouvre trois grands domaines qui sont étroitement liés entre eux :

- D'une part, la variabilité naturelle intrinsèque de l'environnement. La dynamique environnementale est en constante évolution et l'eau en est un acteur fondamental comme vecteur de transport, de vie, de façonnage des paysages, etc.
- D'autre part, le rôle des sociétés humaines qui adaptent cet environnement à leurs besoins dont la ressource en eau est un élément central.
- Enfin, le changement climatique observé depuis environ un siècle et pour lequel les scientifiques ne mettent plus en doute le rôle joué par l'homme (IPCC, 2001). La ressource en eau y est intrinsèquement associée, le réchauffement global ayant des liens reconnus avec les régimes de préci-

pitation et d'écoulement, avec l'étendue des couvertures glaciaires et neigeuses et, enfin, avec la fréquence et/ou l'intensité d'événements extrêmes.

Il est important de noter que ces trois volets sont indissociables. Une tendance récente de certaines analyses est de faire porter sur le seul changement climatique une large partie de la responsabilité des dysfonctionnements environnementaux constatés. C'est en effet une échappatoire commode dans un monde où pour des raisons politiques, économiques ou juridiques, il est plus facile de faire porter le chapeau d'une catastrophe à un événement climatique qu'à chercher une responsabilité dans un choix malheureux d'aménagement. Cela permet de rejeter la responsabilité à un échelon global où tout le monde est impliqué, mais dont personne ne possède la maîtrise. L'échappatoire est peu justifiable : dans les faits, le changement climatique est un nouveau déséquilibre qui s'impose à des conditions environnementales critiques, directement liées aux activités humaines. Le changement climatique en accentue toutefois les conséquences.

La notion de changement global est toujours associée à celle d'espace et de temps.

- En terme d'espace, cela signifie qu'il est important de bien définir les territoires auxquels on s'intéresse et prendre conscience que chaque situation est une situation particulière. Lorsqu'on s'intéresse à la ressource en eau, ces territoires sont souvent des bassins versants permettant d'intégrer la notion amont > aval : en matière de ressource en eau, toute intervention ou tout événement se produisant en un lieu donné est susceptible d'avoir des consé-

quences sur l'espace qui se trouve dans le bassin à l'aval de ce lieu.



- En terme de temps, les changements globaux se manifestent pour la ressource en eau sous toutes les formes, depuis les temps géologiques (formation des paysages, grandes glaciations, par exemple), les échelles séculaires

ou décennales (aménagement des territoires, grands ouvrages hydrauliques, par exemple), les variations annuelles et saisonnières (variabilité climatique interannuelle, rotation des cultures, par exemple), jusqu'aux événements instantanés (crues et sécheresses, ruptures de réservoir, par exemple).

Le changement climatique intervient en association avec les autres changements à toutes ces échelles d'espace et de temps et il est difficile de faire la part de ce qui lui revient et de ce qui relève d'autres processus, qu'ils soient naturels ou qu'ils soient liés aux activités des sociétés humaines.

ÉVALUATION DE L'IMPACT DU CHANGEMENT CLIMATIQUE SUR LA RESSOURCE EN EAU

L'hydrologue est donc confronté à un problème délicat lorsqu'il cherche à évaluer la part due au changement climatique dans les modifications observées sur la ressource en eau en un lieu et à un moment donné. Cela est d'autant plus vrai lorsqu'il s'agit de faire des projections à moyen ou à long terme. Les simulations prospectives sont cependant nécessaires pour de nombreuses raisons. Un exemple l'illustrera aisément.

Même s'ils sont parfois contestés (il ne s'agit pas ici de discuter de ce point), les grands ouvrages hydrauliques (barrages, canaux, périmètres irrigués, usines hydroélectriques, endiguement) sont des investissements très coûteux destinés à durer plusieurs dizaines, voire centaines, d'années. Le financement de tels ouvrages est le plus souvent prévu avec un amortissement sur des durées très longues (50 ans et plus). Le rendement de ces ouvrages est donc établi sur une évaluation statistique de leur hydraulité (rapport du volume d'eau

disponible sur un cycle donné, par rapport à un cycle moyen de même nature) faite à partir de l'observation considérée comme stable (on dit aussi stationnaire). Un changement climatique a pour conséquence une instationnarité de l'observation statistique qui va introduire une erreur difficile à quantifier sur le calcul et les conditions de l'amortissement financier de la construction de l'ouvrage.

Aujourd'hui les hydrologues disposent de deux familles de méthodes pour évaluer l'impact du changement climatique sur la ressource en eau : celles qui s'appuient sur l'analyse statistique des séries d'observations et celles qui consistent à conceptualiser au moyen de modèles mathématiques, généralement complexes, l'ensemble des processus en jeu :

- L'analyse statistique des observations permet de dégager des tendances et des évolutions, ainsi que des ruptures dans les séries temporelles, marquant des changements dans la stationnarité des séries. Ces observations concernent aussi bien les données climatiques que la ressource en eau de surface et souterraines. Si les premières sont le plus souvent ponctuelles (depuis une vingtaine d'années seulement, l'observation satellitaire ou à l'aide de radars terrestres, permet cependant de les spatialiser avec une plus ou moins bonne précision et résolution), les secondes intègrent en un lieu donné l'ensemble des processus naturels et artificiels qui se sont produits à toutes les échelles de temps à l'amont de ce lieu. En Europe, il existe un certain nombre de stations climatiques et hydrologiques dont la durée d'observation dépasse la centaine d'années.
- La modélisation se déroule actuellement en deux étapes. Une première étape qui consiste à mettre en œuvre des modèles de circulation générale fournissant les paramètres

de forçages climatiques. Ils ont été présentés dans la première partie de ce rapport. L'hydrologue utilise essentiellement deux variables en sortie de ces modèles : la précipitation et la température. La précipitation est la variable d'entrée dans le cycle de l'eau continentale, qu'elle soit sous forme solide (neige) ou liquide (pluie) ; c'est une information éminemment variable dans le temps et dans l'espace et la résolution actuelle des modèles de circulation générale ne la donne pas toujours avec une très grande précision. La température est la résultante du bilan énergétique entre le continent et l'atmosphère ; elle permet donc de régler l'ensemble des processus d'échange. La deuxième étape consiste dans l'application de ces paramètres, perturbés par le changement climatique, dans des modèles de fonctionnement qui vont permettre de simuler la distribution de l'eau et son transfert sur le continent, en surface comme dans le compartiment souterrain. On conçoit bien que cette deuxième étape est étroitement liée au milieu dans lequel elle se déroule, à sa description et à son évolution. Aujourd'hui, lorsque les prévisions issues des modèles climatiques sont utilisées pour simuler des situations futures, on ne peut utiliser ces modèles de fonctionnement qu'en faisant des hypothèses très simples sur ce que seront les milieux d'application dans le futur, parfois même en considérant que le milieu du futur sera le même que celui du présent (ce qui est peu vraisemblable a priori).

Ces considérations expliquent pourquoi il convient d'être prudent dans l'interprétation des résultats qui sont présentés lorsqu'on parle d'impact du changement climatique sur la ressource en eau. Il n'en reste pas moins que lorsque les modèles confirment les observations et que lorsque les observations indiquent des tendances significatives, l'attention et

l'analyse des hypothèses les plus pertinentes sont nécessaires pour, d'une part, prendre la mesure de l'évolution et, d'autre part, agir sur les activités humaines et sur l'aménagement du territoire pour rééquilibrer les effets négatifs du changement climatique sur la disponibilité de la ressource en eau.

CHANGEMENT CLIMATIQUE ET RESSOURCE EN EAU

Devant la complexité des interactions multiples, il est légitime de se poser la question de savoir s'il y a un réel impact du changement climatique sur la ressource en eau ou si le signal de ce changement reste faible devant l'amplitude des conséquences liées à d'autres changements.

Les résultats des modélisations qui ont été réalisées récemment sur trois grands bassins français, la Seine, Le Rhône et l'ensemble Adour-Garonne, indiquent une tendance à une diminution probable des débits d'étiage durant les mois d'été à l'horizon 2100 sous les hypothèses des scénarios du GIEC ; cette diminution est principalement due à l'augmentation de l'évaporation avec la température. En hiver les résultats ne sont pas significatifs, couvrant une large enveloppe de part et d'autre de la situation actuelle ; en effet, les effets contradictoires d'une diminution de la couverture neigeuse et d'une augmentation des précipitations hivernales sont variables selon les régions et selon les hypothèses et les modèles utilisés (voir figures 2 et 4 du chapitre sur les changements climatiques en France par Serge Planton). Ces tendances, parfois contradictoires, soulignent la prudence qu'il faut conserver dans l'interprétation de résultats soumis à des influences qui ne sont pas uniquement climatiques.

En France, la manifestation directe la moins contestable du changement climatique sur la ressource en eau concerne le

recul des glaciers et la diminution de la couverture neigeuse, en particulier en moyenne montagne, avec les conséquences qui les accompagnent. Une autre manifestation directe est la modification de la fréquence et de l'intensité des événements climatiques extrêmes (précipitations, vent, températures). Toutefois, dans ce cas, les conséquences observables sont liées au rôle de tampon joué par le milieu et par son usage qui peuvent parfois amplifier considérablement le signal climatique. C'est, par exemple, le cas de fortes précipitations en milieu urbanisé conduisant à des inondations dévastatrices, comme à Nîmes en octobre 1988, ou bien le cas d'une irrigation intensive utilisant les réserves appauvries d'eau après une période de faibles précipitations, comme lors de l'été 2005 dans tout l'ouest de la France.

Dans pratiquement toutes les autres situations, l'effet du changement climatique est combiné avec des altérations du milieu liées aux activités humaines. C'est dans une certaine mesure rassurant, puisqu'on peut penser qu'une adaptation raisonnée est envisageable, tout au moins pour ce qui concerne la ressource en eau dans le cas de notre pays.

RÉFÉRENCES

n A l'initiative du Programme National GICC, le Ministère de l'Écologie et du Développement Durable et le Groupement MEDIAS-France préparent actuellement un ouvrage collectif de synthèse sur l'impact du changement climatique sur la ressource en eau, en particulier en France. Coordonné par Pierre Chevallier, plusieurs des auteurs du présent rapport doivent y participer. Il devrait être disponible vers le milieu de l'année 2006.

n Une partie des idées développées dans ce chapitre est issue d'une présentation faite dans le cadre du Forum Mondial du Développement Durable.

n Chevallier, P., Les ressources en eau, in *Pour que revive la Planète - Panorama 2004 - Forum Mondial du Développement Durable* ; T1 : *L'environnement harcelé* ; T2 : *Croissance économique et développement / La gouvernance et la cohésion sociale*, J.-P. Hauet (éditeur), pp. 37-57, Passages, Paris, 2004. Existe aussi en CD-Rom (Edité par BEA Conseil).

Pour en savoir plus :

Institut de Recherche pour le développement : www.ird.fr

Institut Languedocien de recherche sur l'Eau et l'Environnement :
www.ifr-ilee.org

Global Water Partnership / Partenariat Global pour l'Eau,
Stockholm www.gwpforum.org

World Water Council / Conseil Mondial de l'Eau, Marseille
www.worldwatercouncil.org

International Water Management Institute / Institut International
pour la Gestion de l'Eau, Colombo www.iwmi.cgiar.org,

International Hydrological Programme / Programme Hydrologique
International, www.unesco.org/water/ihp,

2.3 Impact sur la couverture neigeuse

Eric Martin - Météo France

Eric Martin est chercheur au Groupe de météorologie à moyenne échelle du Centre national de recherches météorologiques (CNRM) de Météo-France. Ancien directeur du Centre d'études de la neige. Il fait partie des auteurs du prochain rapport du GIEC.

MESSAGES CLÉS

- La couverture neigeuse des massifs montagneux français est directement liée aux conditions climatiques. Le réchauffement à venir tend à diminuer la durée de l'enneigement et l'épaisseur du manteau neigeux.
- Les études de modélisation suggèrent qu'un réchauffement de 2°C par rapport aux conditions moyennes de la décennie 1980-90, aurait des effets notables sur les conditions d'enneigement à moyenne altitude (de 1500m à 2500m) et un effet moins marqué à haute altitude (au delà de 2500m). Ainsi, à 1500m on passerait de 5 à 4 mois d'enneigement dans les Alpes du Nord et de 3 à 2 mois dans les Alpes du Sud et les Pyrénées induisant une diminution de 40% à 50% du manteau neigeux. En altitude, l'enneigement serait réduit d'une douzaine de jours.
- En cas de réchauffement plus important, la diminution du manteau neigeux serait encore plus prononcée. Les hautes altitudes, relativement épargnées pour un réchauffement modéré, commenceraient à être fortement touchées.
- Les modifications de la couverture neigeuse devraient également être causées par des modifications des régimes hydrologiques des rivières de montagne, de la végétation à haute altitude et de l'enneigement des stations de sport d'hiver. Les études récentes suggèrent une remise en cause de l'existence des stations de sport d'hiver de moyenne montagne.

INTRODUCTION

L'enneigement des massifs montagneux français est très étroitement lié aux conditions météorologiques hivernales et à leurs variations : en fait, la couverture neigeuse à un instant donné est déterminée par la succession des conditions météo-

rologiques depuis le début de l'hiver. La couverture neigeuse est donc fortement variable d'une année sur l'autre, en liaison avec la variabilité de la circulation atmosphérique et donc du trajet des perturbations. Cette dépendance très forte de la couverture neigeuse aux facteurs météorologiques

indique que celle-ci réagira aux variations climatiques qui se produiront au cours du XXI^e siècle.

IMPACTS D'UN RÉCHAUFFEMENT CLIMATIQUE SUR LA COUVERTURE NEIGEUSE

Des études d'impact menées par le Centre d'études de la neige de Météo-France sont disponibles sur les Alpes et les Pyrénées (Martin et al., 1994, Martin et Etchevers, 2005). Le Centre d'études de la neige a, dans un premier temps effectué une simulation de référence sur une dizaine d'années (1981/1990) à partir d'un système d'analyse météorologique adapté à la montagne (SAFRAN) et d'un modèle du manteau neigeux (CROCUS) qui a calculé l'enneigement résultant pour les différents massifs et pour différentes altitudes. Un scénario simple d'augmentation uniforme de température de 2°C a ensuite été appliqué.

Pour une région donnée, l'impact dépend bien évidemment de l'altitude. A haute altitude (au-dessus de 2500m environ), les conditions actuelles sont suffisamment froides pour que l'enneigement ne soit touché qu'à la marge: début un peu retardé, fonte légèrement plus rapide (une douzaine de jours en moins au total), et une petite diminution de la hauteur de neige. En effet, à cette altitude il existe une période froide assez longue durant l'hiver, pendant laquelle le manteau neigeux est capable de « résister » à une augmentation de température (c'est-à-dire ne fond pas). Au dessous de cette altitude, cette période froide se réduit, et disparaît vers 1800-2000m environ. L'impact devient alors très important. Par exemple, à 1500 m, c'est une diminution du nombre de jours avec neige au sol de l'ordre d'un mois qui se produirait, ce chiffre étant valable sur l'ensemble des massifs. On passerait

alors de cinq à quatre mois d'enneigement par an dans les Alpes du nord (Figure 1), et de trois à deux mois dans les Alpes du sud ou les Pyrénées (Figure 2). Toujours à cette altitude, l'épaisseur de neige diminuerait fortement : une quarantaine de centimètres en moins dans les Alpes du Nord (pour une hauteur d'un mètre environ actuellement), une vingtaine en moins pour les Alpes du sud et les Pyrénées (actuellement environ trente à quarante centimètres). Même si une étude comparable n'a pas été faite sur les autres massifs français, on peut s'attendre au même type de résultat.

Pour un réchauffement plus important (supérieur à 3°C), il n'y a pas d'études similaires. On peut néanmoins estimer les conséquences d'un tel réchauffement à partir des résultats précédents. Aux basses altitudes (1200 m et au-dessous), l'enneigement devient très faible avec un réchauffement de

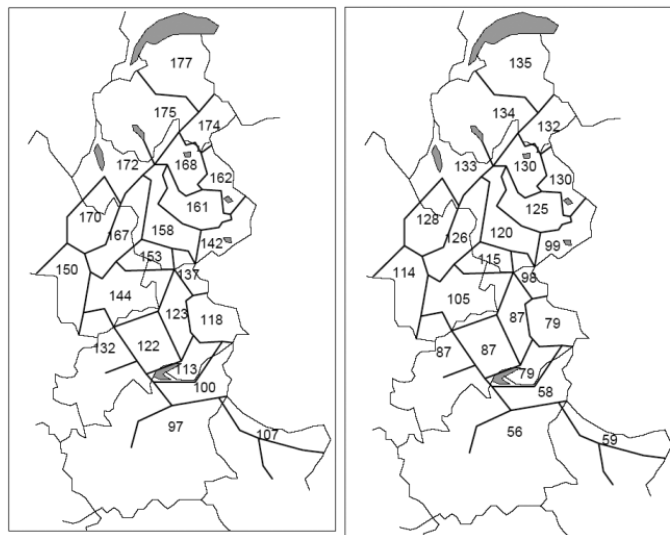


Figure 1: Simulation de la durée moyenne de l'enneigement à 1500 m. (en jours par an) dans les Alpes dans la situation actuelle (à gauche) et avec une augmentation de la température de 2°C (à droite). Source: modèles SAFRAN et CROCUS de Météo France.

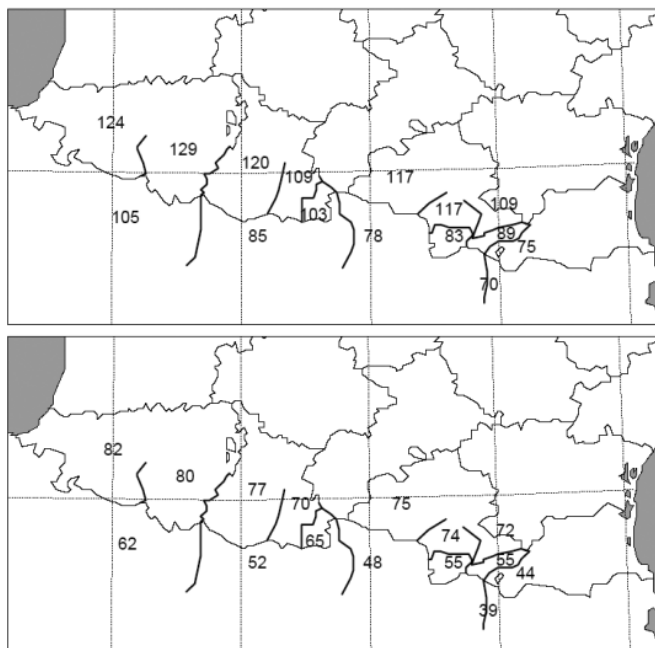


Figure 2 : Simulations de la durée moyenne de l'enneigement à 1500 m (en jours par an) dans les Pyrénées pour la situation actuelle (en haut) et pour une augmentation de la température de 2°C (en bas). Source: modèles SAFRAN et CROCUS de Météo France.

2°C. Une augmentation plus forte de la température ne modifierait pas ce résultat. Au dessus (1500 à 1800 m), un réchauffement supplémentaire entraînerait une forte baisse du manteau neigeux. En effet, ces altitudes sont sensibles au réchauffement, et d'autre part le manteau neigeux reste encore significatif après réchauffement de 2°C (en particulier dans les Alpes du Nord). Plus haut, vers 2000 m, la baisse de l'enneigement commencerait à être marquée (alors qu'avec 2°C la baisse serait assez faible). Enfin, à très haute altitude, il est probable que la baisse de l'enneigement se poursuive à un taux faible mais légèrement supérieur à celui estimé précédemment (une douzaine de jours en moins pour 2°C en plus).

LES INCERTITUDES ASSOCIÉES AUX SCÉNARIOS

La durée de la couverture neigeuse est assez bien corrélée à la température. Elle l'est plus faiblement aux chutes de neige. En effet, la durée de l'enneigement est principalement influencée par la fonte (donc la température), très rapide au printemps. L'épaisseur du manteau neigeux en hiver est, elle, directement liée aux chutes de neige. Elle est le résultat de l'accumulation des différentes chutes de neige du début de saison. L'effet de la température est visible indirectement : une augmentation de température va entraîner une diminution des chute de neige au profit des pluies. Les variations de précipitations sont donc le facteur le plus important à prendre en compte après les variations de température.

Si l'on suppose, comme semblent l'indiquer les scénarios climatiques, que les précipitations hivernales auront tendance à augmenter sur la moitié nord de la France, on peut s'attendre à une augmentation légère de la hauteur de neige en hiver à haute altitude dans les Alpes du nord si le réchauffement reste faible. A moyenne altitude, les variations de précipitation n'auront que peu d'impact car c'est bien la température qui reste le facteur prépondérant.

CONSÉQUENCES DES VARIATIONS DE L'ENNEIGEMENT DANS DIFFÉRENTS DOMAINES

Les variations de la couverture neigeuse auront des conséquences dans des domaines connexes, comme les avalanches, l'hydrologie des rivières de montagne, la végétation de montagne et le tourisme hivernal.

Les avalanches les plus dangereuses, celles qui menacent les villages ou bâtiments en montagne (la dernière période de très forte activité avalancheuse s'est produite en Février

1999 en France) nécessitent la conjonction de trois facteurs : des chutes de neige abondantes, des températures froides (pour que les fonds de vallées soient enneigés et que la neige ne se stabilise pas trop vite) et une chute de neige très intense qui est, en quelque sorte, l'élément déclenchant. Les avalanches peuvent alors prendre une grande ampleur, générer un aérosol (« avalanche de poudreuse ») et prendre des trajectoires inhabituelles. L'augmentation de température ne va pas favoriser ce type de situations. Ce sont les situations d'avalanche de printemps (neige humide), aux parcours plus prévisibles qui risquent d'augmenter (Martin et al., 2001). Il est cependant difficile d'être catégorique car le facteur déterminant sera la variabilité future du climat et sa propension à générer les situations propices évoquées plus haut.

Le régime des rivières des bassins versants enneigés est marqué par un étiage hivernal, suivi par une augmentation forte des débits pendant la période de fonte. La période de débit fort se prolonge ensuite plus ou moins longtemps pendant



l'été en fonction de l'altitude du bassin et de la présence ou non de glaciers. L'étude sur le bassin versant du Rhône menée dans le cadre du programme Gestion et impact du changement climatique du ministère de l'Ecologie et du développe-

ment durable montre un changement notable dans le régime des rivières de montagne. Un ensemble de scénarios climatiques a été appliqué, avec des augmentations de température variant de 1 à 2°C (Etchevers et al., 2001, 2002). L'impact des différents scénarios sur le débit de la Durance à La Clapière¹ a été étudié (Figure 3). Les conséquences principales sont une nette avancée du pic de fonte (d'un mois environ), une légère augmentation des débits hivernaux, ainsi qu'une augmentation des débits en automne (liée à une mise en place retardée du manteau neigeux). Ce type de comportement est général pour les rivières à forte composante nivale. Dans les bassins versants de moyenne montagne, la disparition du caractère nival des rivières (étiage hivernal et pic de fonte au printemps) est possible.

La végétation de montagne est bien sûr sensible aux effets directs du réchauffement, mais réagira aussi à ces effets indirects que sont l'allongement de la période de sol déneigé, donc de la période de végétation (Körner, 2003). Il faut s'attendre à une montée progressive de la limite supérieure de la forêt et de l'ensemble des plantes, limitant d'autant la zone des plantes alpines (Theurillat et Guisan, 2001).

Le tourisme hivernal en montagne reposant sur la disponibilité de la neige, celui-ci sera affecté par le réchauffement (voir texte de Ceron et Dubois). Dans ce domaine, le changement climatique n'est pas le seul facteur à prendre en compte. La qualité des prestations, la concurrence d'autres destinations, l'évolution des goûts du public sont aussi des élé-

¹La Clapière est une station de mesure de débit située à Embrun, immédiatement en amont du barrage de Serre Ponçon. Le bassin versant correspondant a une surface de 2100 km² environ, avec des altitudes variant de 700 à plus de 4000 m.

ments qui comptent. Néanmoins, l'accès à un domaine suffisamment enneigé est essentiel. Même si on ne dispose pas d'études sur le potentiel des enneigeurs dans le contexte d'un changement climatique, il faut s'attendre à ce que ceux-ci soient de moins en moins efficaces, d'une part par manque de froid pour la production, et d'autre part parce que les condi-

tions plus chaudes auront tendance à faire fondre la neige fabriquée plus facilement. Ceci pourrait donc remettre en cause l'existence même des stations de sport d'hivers de moyenne montagne, comme l'a souligné une étude menée en Suisse (Elsasser and Brücki, 2002).

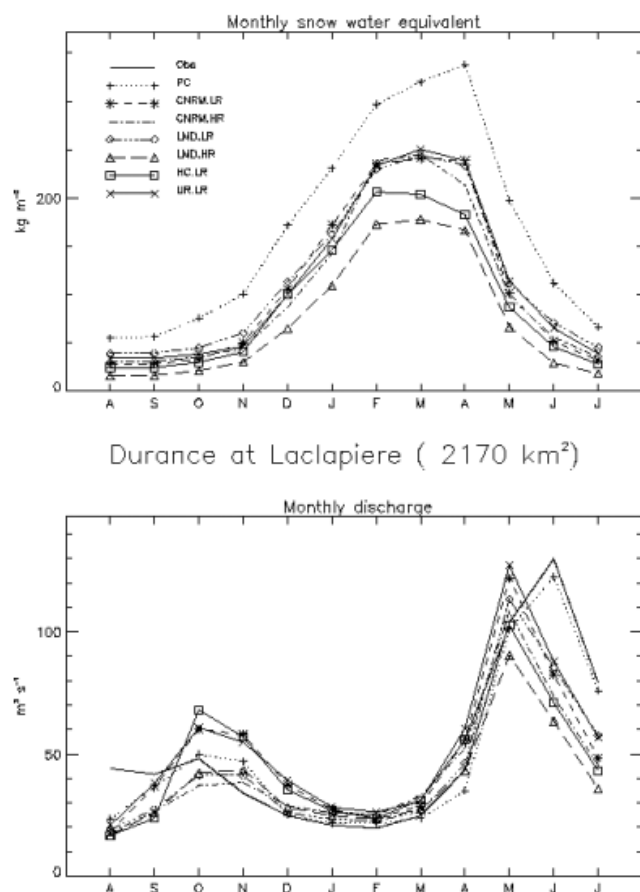


Figure 3 : évolution du manteau neigeux et débits moyens mensuels sur le bassin de la Durance à la Clapière. Obs : observation (débits seulement), PC : climat actuel (résultats de la modélisation pour le climat actuel), le reste : six scénarios climatiques

RÉFÉRENCES

- n Etchevers, P. Y. Durand, F. Habets, E. Martin and J. Noilhan. 2001 : Impact of spatial resolution on the hydrological simulation of the Durance high-Alpine catchment, France, *Ann. of Glaciol.*, 32, 87-92.
- n Etchevers, P., C. Golaz, F. Habets and J. Noilhan. 2002 : Impact of a climate change on the Rhône river catchment hydrology. *J. of Geophys. Res.*, 107, D16, 10.1029/2001JD000490.
- n Elsasser, H. and R. Brücki, 2002: Climate change as a threat to tourism in the Alps, *Clim. Res.*, 20, 253-257.
- n Körner, C. 2003. *Alpine Plant Life*. 2nd Ed. Springer.
- n Martin, E., G. Giraud, Y. Lejeune and G. Boudart, 2001: Impact of climate change on avalanche hazard. *Ann. glaciol.*, 32, 163-167.
- n Martin, E., E. Brun and Y. Durand, 1994 : Sensitivity of the French Alps snow cover to the variation of climatic variables, *Annales Geophysicae*, 12, 469-477.
- n Martin, E. and P. Etchevers, 2005: Impact of climatic change on snow cover and snow hydrology in the French Alps. In: *Global Change and Mountain Regions (A State of Knowledge Overview)* [Huber U. M., H. K. M. Bugmann and M. A. Reasoner (eds.)], Springer, Dordrecht, pp.235-242.
- n Theurillat, J.-P. and A. Guisan, 2001: Potential impact of climate change on vegetation in the European Alps: a Review. *Climatic Change*, 50, 77-109.

Pour en savoir plus :
Météo France: www.cnrm.meteo.fr
GICC : medias.obs-mip.fr/gicc/

2.4 Impact sur les glaciers alpins

Christian Vincent - Laboratoire de Glaciologie et Géophysique de l'Environnement

Christian Vincent est Ingénieur de Recherche au Laboratoire de Glaciologie et Géophysique de l'Environnement du CNRS à St Martin d'Hères. Il est responsable du Service d'Observations des glaciers alpins, et correspondant national du World Glacier Monitoring Service (WGMS).

MESSAGES CLÉS

- Les glaciers alpins sont très sensibles aux variations climatiques. Leurs fluctuations ont une forte variabilité naturelle, ceci à l'échelle centennale, décennale et annuelle.
- L'évolution des glaciers alpins est un excellent indicateur du climat passé et à venir. Elle constitue un indicateur fiable du réchauffement climatique qui fait l'objet d'un suivi intense de la part de la communauté scientifique internationale.
- Depuis 1840 environ les glaciers alpins sont globalement en récession. Depuis 1982, la récession s'est accélérée sous l'effet d'un réchauffement estival évident. Les glaciers alpins ont aujourd'hui régressé à un niveau encore jamais atteint au cours des quatre derniers siècles.
- Quels que soient les scénarii envisagés pour le climat futur, les glaciers français seront fortement affectés. Ceux dont les sommets sont situés à des altitudes inférieures à 2900 m sont condamnés à disparaître car ils ne sont pas encore en équilibre avec le climat moyen du 20ème siècle. Les autres connaîtront des réajustements selon l'amplitude du réchauffement à venir.
- Pour un réchauffement supérieur à 1°C les glaciers alpins connaîtront des réajustements et des retraits importants. Pour un réchauffement supérieur à 3°C la plupart des glaciers français seront réduits à néant, seuls les plus hauts glaciers du massif du Mont Blanc pourraient résister, au prix d'un fort réajustement de leurs surfaces et de leurs longueurs.

INTRODUCTION

L'évolution des glaciers est l'un des indicateurs importants sélectionnés par le Groupe Intergouvernemental sur l'Evolution du Climat (GIEC) pour situer la variabilité et les

tendances climatiques au cours du dernier siècle (GIEC, 2001). La sensibilité des bilans de masse glaciaire aux variations climatiques est largement reconnue par la communauté scientifique internationale (Oerlemans, 1986 ; Haeberli,

1995) et a été étudiée en détail dans les Alpes françaises (Vincent, 2002). Les glaciers constituent désormais un indicateur climatique essentiel pour le passé comme pour le futur (Haeberli, 1998 ; GIEC, 2001).

LES DONNÉES

Le premier paramètre étudié est le bilan de masse des glaciers alpins. Le bilan de masse est le résultat de l'accumulation dues aux précipitations neigeuses, et des ablations par fusion de la neige et/ou de la glace induites par les flux énergétiques (rayonnement solaire, température, ...) provenant de l'atmosphère. Ainsi, les mesures des bilans de masse hivernaux (octobre à mai) et estivaux (juin à septembre) fournissent respectivement une image directe des précipitations hivernales et des bilans énergétiques estivaux¹. Des observations de ce paramètre sont réalisées sur quelques glaciers depuis plus de 50 ans. Depuis 1994, ces observations sont systématiques et continues sur l'ensemble de la surface de 5 glaciers français (Argentière, Mer de Glace, Gébroulaz, Saint Sorlin et Sarennes) et sont aujourd'hui intégrées dans un Service d'Observation géré par le LGGE et soutenu par l'Institut National des Sciences de l'Univers.

Un autre paramètre est la longueur des glaciers. Les fluctuations de longueur dépendent non seulement des conditions climatiques mais aussi de la géométrie du glacier et de ses conditions d'écoulement. Ces fluctuations de longueur, une fois traitées par un modèle mathématique d'écoulement, permettent de fournir une image indirecte du climat. Ce type

d'observations existe depuis 150 ans environ sur quelques glaciers alpins. D'autres données indirectes, telles que les données dendroclimatiques² ou les archives historiques, permettent de reconstituer sur une période de plusieurs milliers d'années les fluctuations de ce paramètre.



(c) Sammlung der Gesellschaft für ökologische Forschung: Mer de Glace bei Montanvert, Chamonix/Frankreich, vor 1916



(c) Gesellschaft für ökologische Forschung / Wolfgang Zingg: Mer de Glace bei Montanvert, Chamonix / Frankreich, 14.8.2001

¹ Le schéma est nettement plus complexe dans d'autres régions climatiques pour lesquelles les périodes d'accumulation et de fusion en un même site peuvent se succéder à l'échelle mensuelle ou même journalière.

² L'étude du climat à partir des troncs d'arbres fossiles dans les moraines.

LES FLUCTUATIONS PASSÉES

Au cours des 3000 dernières années, les fluctuations d'une poignée de glaciers ont été reconstituées grâce à la datation des troncs d'arbres et des tourbes retrouvés dans les moraines glaciaires (Holzhauser et al., 2005). Ces données montrent de fortes fluctuations des glaciers alpins au cours de cette période ; en particulier, ces glaciers ont connu une forte

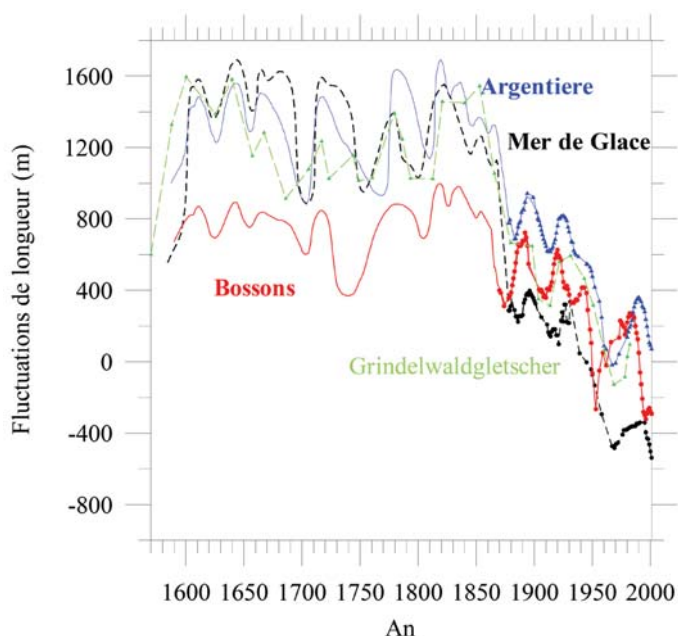
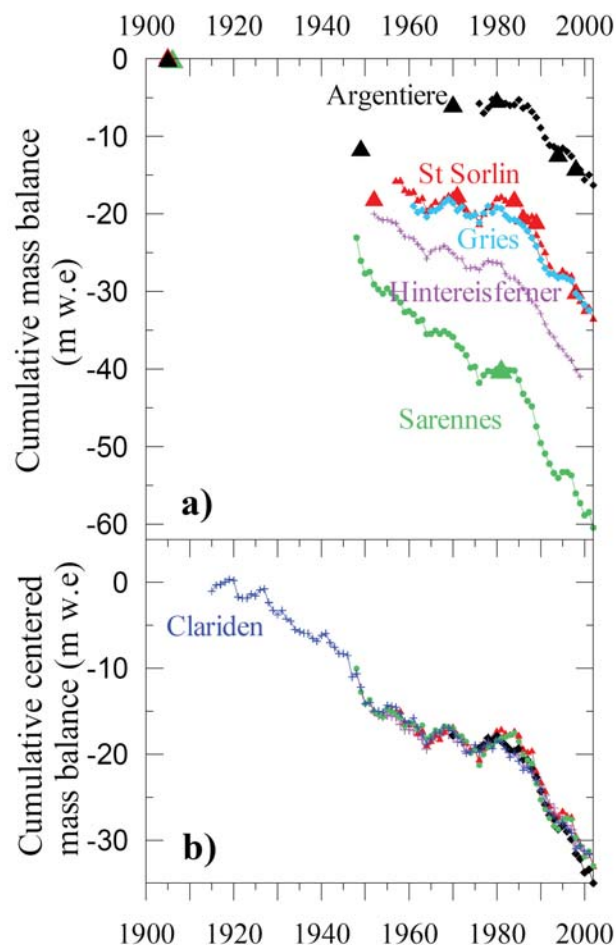


Figure 1 : Evolution de quelques glaciers dans l'ensemble des Alpes, a) bilans de masse cumulés de ces glaciers : ils représentent des variations d'épaisseur moyennes. Par exemple, la perte de 32 m d'eau du glacier de St Sorlin au cours du 20ème siècle signifie qu'il a perdu l'équivalent d'une lame d'eau de 32 m en moyenne sur l'ensemble de sa surface. Ces données sont issues d'observations directes de terrain (points) ou de comparaison de cartes (larges triangles). b) bilans de masse cumulés centrés et ajustés sur la tendance de St Sorlin. Ces courbes mettent en évidence un signal commun à l'échelle des Alpes au cours des 50 dernières années. Source : adapté de Vincent et al., 2004.

période de récession il y a 3200 ans et les dernières recherches dendroclimatiques indiquent que leurs surfaces étaient plus réduites qu'aujourd'hui. La période romaine, il y a 2000 ans, montre également une forte contraction des glaciers, avec des surfaces équivalentes à celles de la fin du 20ème siècle (Holzhauser et al., 2005). D'autres périodes, au contraire, sont marquées par des crues impressionnantes comme celle que l'on nomme le « Petit Age de Glace » entre la fin du 16ème siècle et le milieu du 19ème. Lors de la dernière extension du Petit Age de Glace (vers 1830), les glaciers alpins avaient des longueurs supérieures de 800 m à 2.5 km par rapport à l'actuel (Figure 1). A partir de 1850, la grande majorité des glaciers alpins entame une forte régression qui se prolonge jusqu'à aujourd'hui, bien que cette récession générale ait été interrompue par des réavancées marquées à la fin du 19ème siècle et au cours du 20ème siècle.

L'analyse de longues séries de bilans de masse observés dans les Alpes autrichiennes, suisses et françaises ont permis de comprendre les causes de ces fluctuations au cours du 20ème siècle (Vincent et al., 2004). Ces séries ont une cinquantaine d'années, à l'exception de la série de Clariden (Suisse) qui est exceptionnelle puisqu'elle date de 1914. Cette série est unique pour l'étude de l'accumulation hivernale et de la fusion estivale à l'échelle du siècle. Les bilans de masse glaciaires moyens annuels sont très différents d'un site à l'autre (Figure 2a) puisque le glacier de Sarennes perd en moyenne 0.62 m d'eau par an (l'équivalent d'une lame d'eau de 62 cm sur toute sa surface) alors que le glacier d'Argentière perd seulement 15 cm d'eau par an. Mais si l'on retire ces tendances (figure 2b), on met alors en évidence un signal climatique remarquablement commun à l'échelle de l'ensemble des



Alpes (de Sarennes, en France à Hintereisferner, en Autriche, à 400 km de distance) pour les 50 dernières années. (Figure 2b). Quel signal climatique ?

Une analyse détaillée a montré que le 20^{ème} siècle pouvait être divisé grosso modo en 4 périodes (Vincent, 2002) : entre le début du 20^{ème} siècle et 1941, les glaciers alpins ont peu perdu de masse ; entre 1942 et 1953, ils ont subi des déficits très importants à la fois à cause des faibles précipitations

Figure 2 : Evolution de quelques glaciers dans l'ensemble des Alpes, a) bilans de masse cumulés de ces glaciers : ils représentent des variations d'épaisseur moyennes. Par exemple, la perte de 32 m d'eau du glacier de St Sorlin au cours du 20^{ème} siècle signifie qu'il a perdu l'équivalent d'une lame d'eau de 32 m en moyenne sur l'ensemble de sa surface. Ces données sont issues d'observations directes de terrain (points) ou de comparaisons de cartes (larges triangles). b) bilans de masse cumulés centrés et ajustés sur la tendance de St Sorlin. Ces courbes mettent en évidence un signal commun à l'échelle des Alpes au cours des 50 dernières années. Source : adapté de Vincent et al., 2004.

hivernales et à cause des fortes ablations estivales ; entre 1954 et 1981, les bilans de masse sont en général positifs et provoquent une réavancée importante du front de certains glaciers (plusieurs centaines de mètres pour les glaciers de la Mer de Glace, d'Argentiere et des Bossons dans le Massif du Mont Blanc). Enfin, depuis 1982, les bilans de masse sont très déficitaires. Cette forte régression ne s'explique que par les chaleurs estivales (les précipitations hivernales n'ont pas diminué dans les Alpes françaises sur cette période).

L'étude détaillée des 2 séries de bilans de masse hivernaux et estivaux de Sarennes et Clariden (Vincent et al., 2004) a montré que la forte augmentation de la fusion estivale des 20 dernières années était très similaire pour ces 2 glaciers situés à 290 km l'un de l'autre ce qui signifie que les variations des bilans d'énergie (rayonnement, température...) en surface sont similaires à l'échelle des Alpes : on observe en effet une augmentation de la fusion estivale identique à Sarennes et à Clariden entre 1954-81 et 1982-2002 (0.5 cm d'eau par jour). En outre, dans les zones basses des glaciers, en dessous de 2900 m d'altitude, cette augmentation a une incidence directe sur l'albedo³ de la surface, puisque le glacier est découvert de neige plus tôt dans la saison ; comme l'albedo

de la glace est très inférieur à celui de la neige, la glace absorbe beaucoup plus de radiations et cette modification de l'albedo amplifie la fusion (on parle de rétroaction positive). L'intérêt de ces observations de la fusion de la glace réside principalement dans le fait que l'on peut traduire directement ces valeurs de fusion en énergie (W/m^2). De ce point de vue, les glaciers constituent des indicateurs climatiques naturels sans équivalent. Ainsi, l'augmentation du taux de fusion journalier (environ 0.5 cm eau /jour) observée à la fois à Clariden et à Sarennes entre 1954-81 et 1982-2002 correspond à une élévation des flux d'énergie en surface de 20 W/m^2 (indépendante de l'albedo de surface) ce qui représente une augmentation très importante des quantités d'énergie qui arrivent à la surface. Ces fluctuations des bilans de masse glaciaires montrent ainsi que le climat varie fortement à l'échelle décennale et à l'échelle séculaire. La variabilité annuelle est très forte aussi : par exemple, la valeur d'ablation de 2003 dépasse de deux écarts types la valeur moyenne de 1982-2002 et trois écart types la valeur moyenne de 1954-1981. De telles valeurs d'ablation n'ont jamais été atteintes au cours des 50 dernières années. Il faut remonter à 1947 pour retrouver une valeur équivalente.

En résumé, les fortes fluctuations décennales du 20ème siècle dépendent pour une très large part des bilans estivaux. La variabilité des bilans hivernaux est beaucoup plus faible. Il semble que ce ne soit pas vrai pour le 19ème siècle. En effet, dans une étude récente (Vincent et al., 2005), nous avons montré que les précipitations hivernales sont responsables de la dernière crue des glaciers alpins à la fin du Petit Age de Glace (vers 1830). Au cours de cette période (1760-1830),

les précipitations hivernales ont été supérieures d'au moins 25% à celles du 20ème siècle. La décrue glaciaire de la fin du Petit Age de Glace, après 1830, n'est pas due à un réchauffement mais à une diminution des précipitations

Dans les Alpes, le réchauffement atmosphérique affectera directement la fonte du manteau nival et de la glace.

hivernales. Ce n'est que vers le début du 20ème siècle que le réchauffement est visible dans les Alpes sur les courbes de températures (Böhm et al., 2001) et affecte les glaciers.

LES IMPACTS FUTURS

Dans les Alpes, le réchauffement atmosphérique affectera directement la fonte du manteau nival et de la glace. Mais d'autres effets sont à attendre : d'abord, la saison hivernale des précipitations solides (sous forme de neige) risque d'être plus courte; ça veut dire, d'une part, que le manteau nival sera moins épais ; d'autre part, à partir du mois de mai/juin, le manteau neigeux disparaîtra plus tôt et la ligne de neige du manteau hivernal s'élèvera plus rapidement en altitude. Ainsi, dans la partie basse du glacier, la fonte sera plus active du fait d'un albedo de surface plus faible. En outre, en fin de saison estivale, les arrivées de neiges hivernales (septembre/octobre) risquent aussi d'être plus tardives. Tout cela contribue à allonger la saison d'ablation (au cours des 20

³Rapport entre la quantité de lumière que reçoit un corps et celle qu'il réfléchit ou diffuse. Celui de la neige est très élevé, de l'ordre de 80%

dernières années, la saison d'ablation s'est allongée d'une quinzaine de jours dans les Alpes françaises). En résumé, un réchauffement augmentera les taux de fonte journaliers et allongera la saison d'ablation. Dans ces conditions, la fonte en sera fortement affectée. Dans certaines régions, une augmentation de l'accumulation hivernale (liée à des précipitations de neige hivernale plus importantes) pourrait en partie compenser l'élévation de la fonte estivale. Des études récentes ont montré que, pour compenser une augmentation de température de 1°C, il faut augmenter les précipitations hivernales de 25 à 30 %. Des variations aussi importantes de précipitations ne se sont pas produites au cours du 20ème siècle dans les Alpes (à l'échelle décennale). De telles variations de précipitations dans les régions alpines ne sont pas envisagées dans le futur par les modèles climatiques. En tous les cas, une augmentation des précipitations qui pourraient compenser une élévation des températures supérieure à 1°C (conforme aux prévisions du 21ème siècle) reste fortement improbable.

Alors, que vont devenir nos glaciers ? Ils dépendent de la position de leur ligne d'équilibre (limite entre la zone d'accumulation et la zone d'ablation) et donc de la taille de leur zone d'accumulation. En moyenne sur la dernière cinquantaine d'années, l'altitude de la ligne d'équilibre des glaciers alpins est d'environ 2800-2900 m, en face Nord. Plusieurs scénarios peuvent être envisagés : à climat constant, similaire à celui du 20ème siècle, la plupart des glaciers vont continuer de régresser car, encore aujourd'hui, ils ne sont pas en équilibre avec les conditions climatiques du 20ème siècle. Les petits glaciers, dont les sommets sont au dessus de 2900 m, ne sont plus alimentés et par conséquent sont condamnés à

disparaître (mais ils étaient condamnés dès la fin du Petit Age de Glace). Les autres glaciers dont le bassin d'accumulation se situe au dessus de 2900 m, peuvent résister à un climat moyen équivalent à celui du 20ème siècle mais au prix d'un réajustement : par exemple, la langue du glacier de Saint Sorlin (massif des Grandes Rousses), devrait reculer de 600 à 700 m environ avant d'atteindre une position d'équilibre

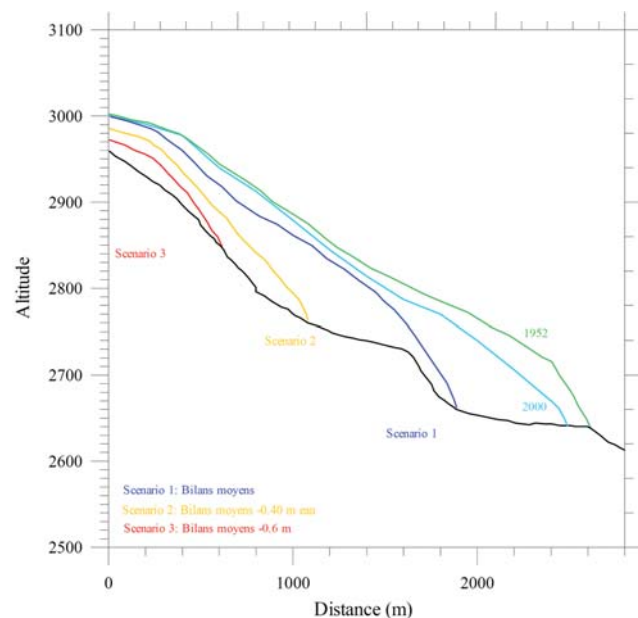


Figure 3 : Evolution du glacier de Saint Sorlin (3km², Massif des Grandes Rousses) : profils en long du glacier observés en 1952, en 2000 et calculés pour différents scénarios. Scénario 1 : Profil calculé pour des conditions climatiques équivalentes à celles du 20ème siècle (bilans de masse moyens du 20ème siècle) : le glacier devrait reculer d'environ 600 à 700 m par rapport à sa position de 2000. Scénario 2 : Profil simulé avec des conditions climatiques équivalentes à celles des 20 dernières années (températures estivales supérieures de 0.7°C par rapport à la moyenne du 20ème siècle ; bilans -0.4 m d'eau) : dans ce scénario, le glacier reculerait de 1.4 km. Scénario 3 : Profil simulé avec des conditions encore plus chaudes (températures estivales supérieures de 1 à 1.5 °C par rapport à la moyenne du 20ème siècle ; bilans -0.6 m d'eau). Adapté de (Vincent et al., 2000) et de (Le Meur et Vincent, 2003).

(Figure 3). Les plus grands glaciers tels que ceux du massif du Mont Blanc régresseront encore un peu mais retrouveront assez rapidement une position d'équilibre. Néanmoins, les temps de réponse des langues glaciaires sont longs et, lors d'une variation climatique, il faut compter 50 à 200 ans avant qu'un glacier retrouve une surface en accord avec les nouvelles conditions climatiques.

Avec des conditions climatiques similaires à celles des 20 dernières années (températures estivales supérieures de 0.7 °C par rapport à la moyenne du 20ème siècle), les glaciers devraient subir une récession encore plus importante : en effet, la ligne d'équilibre moyenne des 20 dernières années se situe à 2900-3000 m. Si ces conditions perdurent, le glacier de St Sorlin devrait reculer de 1.4 km par rapport à aujourd'hui, avant de retrouver une position d'équilibre (Figure 3). Pour un réchauffement supérieur à 3°C par rapport à la moyenne du 20ème siècle, les lignes d'équilibre pourraient s'élever de plus de 300 à 400 m de dénivelé; dans ce scénario, la plupart des glaciers en France seraient réduits à presque rien, exceptés les plus gros glaciers situés au dessus de 4000 m, dans le massif du Mt Blanc.

RÉFÉRENCES

- n Böhm, R., I. Auer, M. Brunetti, M. Maugeri, T. Nanni and W. Schöner, *Regional temperature variability in the European Alps 1760-1998*, *Int. J. Climatol.*, **21**, 1779-1801, 2001.
- n Haeberli, W., *Glacier fluctuations and climate change detection*, *Geogr. Fis. Dinam. Quat.*, **18**, 191-199, 1995.
- n Haeberli, W., M. Hoelzle, S. Suter, and R. Frauenfelder (Compilers), *Fluctuations of Glaciers, 1990-1995*, vol. VII, UNESCO, Paris, 1998.
- n Holzhauser, H., M. Magny and H.J. Zumbühl, *Glacier and lake level variations in west-central Europe over the last 3500 years*, *The Holocene*, **15**, 6, 789-801, 2005
- n IPCC: *Climate Change 2001, Contribution of Working Group I to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, Cambridge University Press, 2001.
- n Le Meur, E. and C. Vincent. *A two-dimensional shallow ice flow of glacier de Saint Sorlin, France*. *Journal of Glaciology*. *Journal of Glaciology*, Vol. **49**, n° 167, 2003.
- n Oerlemans, J., *Glaciers as indicators of a carbon dioxide warming*, *Nature*, **320**, 607-609, 1986.
- n Vincent, C., M. Vallon, L. Reynaud and E. Le Meur, *Dynamic behaviour analysis of glacier de Saint Sorlin, France, from 40 years of observations, 1957-1997*. *Journal of Glaciology*, Vol. **46**, n° 154, 2000.
- n Vincent, C., *Influence of climate change over the 20th Century on four French glacier mass balances*, *J. Geophys. Res.*, **107** (D19), 4375, doi:10.1029/2001JD000832, 2002.
- n Vincent, C., G. Kappenberger, F. Valla, A. Bauder, M. Funk, and E. Le Meur, *Ice ablation as evidence of climate change in the Alps over the 20th Century*, *J. Geophys. Res.*, **109**, D10104, doi:10.1029/2003JD003857, 2004.
- n Vincent, C., E. Le Meur, D. Six and M. Funk, *Solving the paradox of the end of the Little Ice Age in the Alps*, *Geophys. Res. Letters.*, **32** (9), doi : 10.1029/2005GL022552.

Pour en savoir plus :

Service d'Observation des Glaciers alpins:
www-igge.obs.ujf-grenoble.fr/ServiceObs/index.htm

2.5 Impact sur les forêts

Denis Loustau et Jean-Luc Dupouey - Institut National de la Recherche Agronomique

Denis Loustau est directeur de recherche à l'Unité Ecologie Fonctionnelle et Physique de l'Environnement du Centre de Bordeaux. Il a été le coordinateur du projet « CARBOFOR » dans le cadre du programme national Gestion et Impacts du Changement Climatique (GICC). Il a contribué à un rapport spécial du GIEC et fait partie des correcteurs du 4ème Rapport du GIEC.

Jean-Luc Dupouey est directeur de recherche à l'Unité Ecologie et Ecophysiologie Forestières du Centre de Nancy. Il étudie les modifications à long terme des écosystèmes forestiers sous l'effet des changements globaux, en particulier leur rôle dans le bilan de carbone. Il a coordonné la première étude sur l'estimation des stocks de carbone forestier en France.

MESSAGES CLÉS

- Le fonctionnement et la productivité des forêts montrent une dépendance étroite au climat en relation avec les essences présentes et la structure du couvert. Mis à part les effets des événements de 1999 (tempête) et 2003-2005 (canicule et sécheresse), la forêt française a vu sa productivité moyenne s'accroître continuellement depuis 40 ans et une surface encore récemment en extension.
- Au cours de ce siècle, le potentiel global de production de la forêt française sera modifié sous l'effet du changement climatique et ce plus ou moins rapidement suivant la vitesse d'augmentation de la concentration atmosphérique en gaz à effet de serre. Cette modification présentera des variations géographiques importantes. D'ici 2050, le Nord serait avantagé et le Sud plus menacé. La vocation de production des forêts les plus exposées à de futures sécheresses, dans le Sud et l'Ouest, est amenée à être remise en cause.
- Le changement climatique est brutal, il interviendra dans un laps de temps inférieur à 150 ans, c'est-à-dire moins d'une génération pour la plupart des espèces d'arbres présentes en France. Il est discontinu : l'évolution de la production forestière dans le temps présente un maximum de production nette entre 2015 - 2045 suivi d'une diminution ultérieure. Les possibilités d'adaptation génétique des arbres et

peuplements en place sont donc réduites. La sylviculture des forêts françaises devra nécessairement accompagner les effets de ces changements par des substitutions d'essence, des changements des régimes d'éclaircie et de coupe, une gestion adaptée des sous-étages et des sols.

- La capacité de réserve en eau des sols et les conditions locales de disponibilité en nutriments sont des facteurs conditionnant la réponse des peuplements au changement climatique. Les forêts sur les sols à forte réserve utile en eau supporteront a priori mieux l'évolution du climat. Le réchauffement et l'accentuation des déficits en eau des sols pourraient réduire fortement les stocks de carbone de la biomasse et des sols forestiers du Sud de la France.
- Une évolution forte des principales maladies affectant les arbres forestiers en lien avec les changements climatiques est à prévoir, avec une amplification de l'impact des parasi-

tes thermophiles et favorisés par les stress hydriques, et surtout l'apparition de nouvelles maladies. Les changements à venir des enveloppes climatiques des aires de distribution des parasites conduisent à préconiser une gestion anticipative et préventive des risques, en particulier pour limiter la dissémination des parasites à leurs enveloppes actuelles. Le choix des espèces ou variétés pour les reboisements devra être raisonné en fonction de ces risques.

- Si le bilan de carbone de la forêt française est actuellement positif, son avenir est incertain et sujet à de fortes disparités régionales. La capacité des politiques forestières à accompagner les changements prévus et anticiper leurs impacts en relation avec les demandes sociale et économique est une des clés du futur de la forêt française et de sa capacité à remplir les multiples fonctionnalités attendues d'elle.

INTRODUCTION

Le territoire métropolitain voit la convergence d'un ensemble de zones biogéographiques contrastées : zones tempérées, semi-continrentales et océaniques, méditerranéennes, montagnardes. La variété des essences (feuillus caduques et persistants, résineux), des structures de couverts (futaies régulières, taillis, taillis sous futaies, futaies jardinées) et des écosystèmes forestiers est donc large, et ce de façon unique en Europe. En mobilisant des approches expérimentales, des outils de modélisation et de prédiction et les données produites par les réseaux d'observation à long terme, il est possible de prédire les tendances de comportement de ces écosystèmes dans leur réponse aux scénarios climatiques régionalisés 1960-2100 en terme de productivité, cycle du carbone, bio-

géographie et vulnérabilité aux pathogènes majeurs. Les résultats synthétisés ici sont en majeure partie issus du projet de recherche CARBOFOR financé par les ministères de l'écologie et de l'agriculture dans le cadre du programme national G.I.C.C (<http://medias.obs-mip.fr/gicc/>). L'INRA, le CNRM – MétéoFrance, le CNRS, l'Inventaire Forestier National, le CEA, le CIRAD et les universités d'Orsay – Paris-Sud et d'Orléans ont participé à ce projet. Ce projet a analysé un scénario climatique régionalisé construit suivant la vitesse d'augmentation de la concentration atmosphérique en gaz à effet de serre prescrite par le scénario B2 du GIEC qui est une hypothèse plutôt optimiste

DÉPENDANCE CLIMATIQUE DES FORÊTS

Le fonctionnement et la productivité des forêts françaises en terme d'échanges d'énergie (rayonnement, chaleur, vent), CO₂, et eau montrent une dépendance étroite au climat. L'analyse synthétique des données de suivi expérimental du cycle du carbone mis en œuvre sur un réseau de sites ateliers métropolitains appartenant au projet européen CARBOEUROPE¹ montre que si la réponse au climat des couverts forestiers dépend de l'essence principale, elle est aussi fortement contrôlée par la structure du couvert. L'indice foliaire ² d'une forêt, la densité des arbres, son stock de biomasse sur pied, sa hauteur sont autant de paramètres conditionnant sa réponse à des changements climatiques. Un peuplement jeune et ouvert, à croissance rapide, fonctionne très différemment d'un peuplement adulte plus fermé ou d'un couvert d'arbres âgés. Le bilan net en carbone des futaies régulières adultes est une fixation comprise entre 150 et 700 g C m⁻² an⁻¹ (1,5 à 7 t C ha⁻¹ an⁻¹) toutes essences confondues. Il présente de fortes variations interannuelles liées au climat. Cette fixation correspond essentiellement à un accroissement de la biomasse des arbres. Suite à une perturbation comme un chablis, une coupe rase ou un incendie, le flux de carbone s'inverse et la forêt devient une source de carbone perdant de 100 à 300 gC m⁻² an⁻¹ pendant une durée allant de moins d'une année dans le cas d'un taillis à plus d'une dizaine d'années pour les forêts à faible croissance.

Dans l'ensemble, la forêt française se porte actuellement plutôt bien avec une production accrue continuellement depuis 30 ans et une surface encore récemment en expansion (données IFN, <http://www.ifn.fr>). Néanmoins, la période de sécheresse 2002-2005 s'accompagne d'un accroissement de la

mortalité qui nuance ce bilan optimiste.

En France et en Europe, la gestion sylvicole, en modifiant la structure physique du couvert, influence profondément le fonctionnement des écosystèmes forestiers qui sont très majoritairement soumis à une gestion plus ou moins intensive. La sylviculture conditionne leur réponse au climat et la variabilité des flux et bilan de carbone d'une année à l'autre et entre les sites. Le régime de coupe (taillis ou futaie) et la durée des révolutions déterminent la structure d'âge des peuplements forestiers, les stocks de biomasse accumulés et la productivité forestière.

¹Projet intégré européen du 6ème programme cadre de recherche qui étudie le cycle du carbone des surfaces continentales à différentes échelles spatiales. Il rassemble près de 100 laboratoires européens dont, en France, le CNRS, l'INRA, le CEA, Météo France.

² Surface totale du feuillage d'un couvert végétal par mètre carré de sol.



OUTILS DE PRÉDICTION DU CHANGEMENT CLIMATIQUE

La réponse du fonctionnement des forêts aux variations climatiques se prédit avec des modèles de simulation qui synthétisent les connaissances disponibles sur les effets du climat sur les grands processus de fonctionnement dans ces écosystèmes : cycle de l'eau (interception des pluies, transpiration, évaporation, ruissellement), du carbone (photosynthèse et respiration) et, mais de façon beaucoup moins précise, de l'azote (dépôts, minéralisation, nitrification et dénitrification). Les données mesurées dans les observatoires à long terme permettent de comprendre et de vérifier a posteriori les effets du climat. En terme de croissance des arbres et de production de bois à l'hectare, les incertitudes de ces modèles ont été quantifiées autour de 25% en moyenne. Ces approches de modélisation se montrent assez robustes pour prédire l'évolution des différents termes des bilans d'eau et de carbone sur de longues séries temporelles et leur sensibilité au climat.

PARAMÈTRES ENVIRONNEMENTAUX PRIS EN COMPTE ET LIMITES DES PRÉVISIONS

Pour prédire les impacts du changement climatique à relativement petite échelle (mailles de 60 x 60 km), l'expérience de simulation a été conduite avec le modèle ARPEGE de Météo France en mode à maille variable et suivant le scénario d'émission de CO₂ « B2 » du GIEC (voir articles de Criqui et Planton). Le changement climatique lié à l'accumulation de gaz à effet de serre provoquée par les activités humaines n'est cependant qu'une composante du changement global, et s'accompagne d'autres modifications importantes

du milieu physique : une augmentation de dépôts azotés et acides et une élévation de la concentration en ozone, gaz trace toxique pour les végétaux, dans la basse atmosphère. L'urbanisation et le développement des voies de transport augmentent le morcellement des territoires biologiques et modifient la dissémination des espèces : relativement aux arbres qui sont peu mobiles aux échelles de temps considérées, les pathogènes fongiques, les insectes, bactéries et virus se propagent à des vitesses très supérieures et s'équilibrent avec le climat plus rapidement. Enfin, le régime hydrique des forêts, la profondeur des nappes phréatiques en particulier, est conditionné par les usages anthropiques des ressources en eau (voir article de P. Chevallier). Ces changements, dont les effets sont importants pour les arbres, sont éminemment variables d'un site à l'autre et d'une région à l'autre. Mais contrairement au climat, il est difficile d'en représenter un scénario futur et dans l'expérience de simulation sur laquelle s'appuie nos conclusions, seule l'évolution du climat a été prise en compte. Ceci incite à conduire dans le futur des expériences de simulation au niveau territorial a priori plus apte à des études de scénario.

Enfin, le scénario climatique utilisé jusqu'ici simule encore assez mal les événements extrêmes et jusqu'ici rares comme les tempêtes, les épisodes de températures extrêmes, les sécheresses prolongées. Il se prête donc mal à une analyse de l'exposition des forêts à ces risques. Il permet cependant de dégager les tendances moyennes d'évolution sur les cent prochaines années. Il faut toutefois garder en tête que les impacts immédiats et différés de ces événements rares, comme par exemple les sécheresses et canicules exceptionnelles, jouent un rôle critique dans le fonctionnement des écosys-

tèmes terrestres et le cycle du carbone. Ciais et al. (2005) ont montré récemment que la productivité primaire de la végétation a été réduite de 30% durant l'année de canicule 2003 correspondant à un déficit du bilan de carbone terrestre de l'Europe de 0,5 milliard de tonnes de carbone (0.5 GtC.an-1).

IMPACTS EN FRANCE MÉTROPOLITAINE

La simulation 1960-2100 montre une réponse globale positive de la production potentielle des écosystèmes forestiers au scénario climatique en conformité avec les prédictions proposées par d'autres auteurs à l'échelle de l'Europe

(Kramer et Mohren 2001, Milne et Van Oijen, 2005). Les espèces décidues³ profitent légèrement plus que les conifères de l'effet fertilisant du CO₂ et du réchauffement, en particulier par l'allongement de leur saison de végétation, et par le fait que, à l'exception notable du hêtre, leurs stomates se ferment sous CO₂ augmenté, ce qui réduit leur transpiration et atténue l'effet des sécheresses (Figure 1). Cet effet bénéfique est le plus marqué dans le Nord-Est de la France, où le régime hydrique est moins affecté par le scénario. En zone méditerranéenne, Midi-Pyrénées, en basse et moyenne montagne et dans une moindre mesure sur la façade Ouest de la France, la simulation suggère que l'impact grandissant de sécheres-

³Se dit des arbres qui renouvellent leur feuillage chaque année, par opposition aux arbres résineux à aiguilles généralement persistantes.

Production primaire nette (gC . m⁻².an⁻¹)

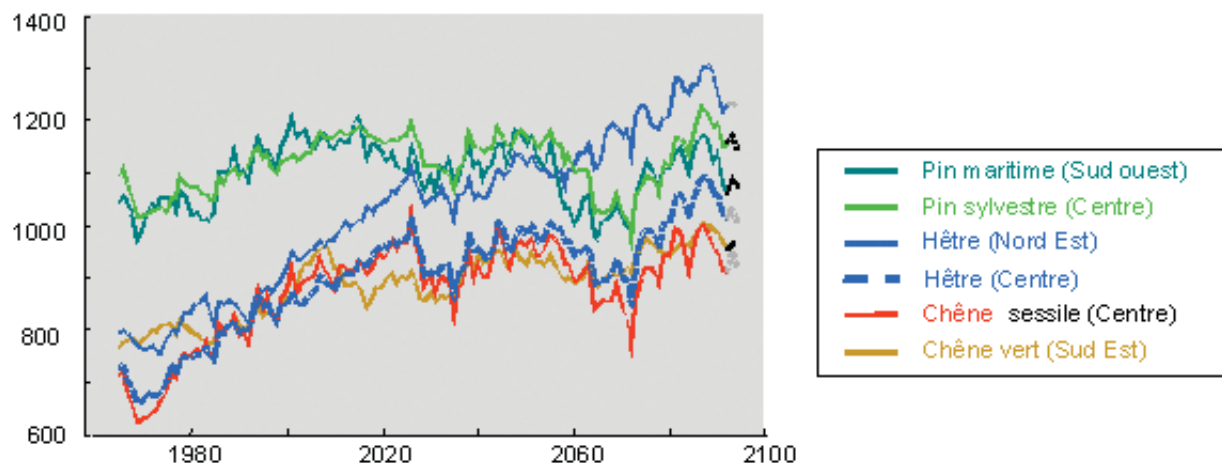


Figure 1: Simulation de l'évolution de la production nette des essences forestières en plaine en France métropolitaine de 1960 à 2100 suivant le scénario B2 du GIEC. Les résultats du Hêtre, simulé à deux localisations différentes où le niveau de productivité est identique en 1995, montrent que le changement

climatique a des effets plus favorables dans le Nord Est que dans le Centre. Les Pins et les Chênes subiraient une diminution importante due à l'aggravation des sécheresses à partir de 2040 à 2050. Source : Modèle CASTANEA, Dufrêne, et al. 2005, et Loustau et al. 2005.

ses plus fréquentes et plus intenses devient prépondérant et amène à une échéance plus ou moins rapprochée une baisse de productivité (Loustau et al. 2005).

La simulation en régime stationnaire de révolutions complètes sous quatre climats, 1980, 2015, 2045 et 2080 aboutit à des résultats variables suivant les régions et les essences considérées. Les effets prédits sont globalement positifs dans le Nord de la France pour les feuillus sociaux avec une réponse cependant décroissante de l'Est vers l'Ouest, la façade Nord-Ouest présentant même une anomalie de production négative. Dans le Sud-Ouest, ils sont positifs en début de siècle puis s'inversent avec une anomalie négative augmentant vers l'intérieur des terres en fin de simulation (2080).

Cette simulation met aussi en évidence plusieurs interactions importantes. Les scénarios de gestion intensifs (forêts de production) et les stations les plus fertiles, à sols profonds, riches en nutriments et à productivité élevée, se montrent plus sensibles au changement climatique. C'est dans ces conditions que sont prédites aussi bien les plus fortes augmentations de productivité (feuillus sociaux (chênes et hêtre) des plaines du Nord-Est de 2000 à 2050) que les plus fortes réductions (plantations forestières à croissance rapide du Sud au-delà de 2040).

La projection de ces simulations sur l'ensemble de la France à l'aide de modèles plus génériques⁴ confirme l'importance de ces interactions et le comportement variable des types fonctionnels de la forêt française. Elle souligne le contraste entre les effets plutôt bénéfiques ou neutres prédits sur le tiers Nord-Est du pays, où est localisée une grande partie des futaies feuillues, et le Sud et l'Ouest exposés en fin de siècle

à des sécheresses aggravées et au réchauffement le plus élevé (Loustau et al. 2005).

a) Répartition potentielle des essences en France métropolitaine

La distribution des aires géographiques potentielles des essences sur le territoire national telle qu'elle est projetée au travers du scénario climatique fait apparaître un déplacement des groupes d'essences méridionaux vers le Nord et vers l'Est (Figure 2). Les groupes montagnards (tel que le sapin) et continentaux tendent à régresser fortement. Le cas du hêtre qui est réduit à l'extrême Nord-Est du territoire national en 2100 est emblématique à cet égard. Cette conclusion rejoint les résultats prédits en terme de fonctionnement et de production. Les espèces les plus sensibles et donc vulnérables sont les espèces supportant mal les sécheresses et se trouvant en France à la limite Sud de leur aire naturelle, comme le Hêtre, le Pin sylvestre ou l'Epicéa. Concernant la production et le cycle du carbone, on observe ici une extension de la forêt méditerranéenne, de productivité faible, au détriment des forêts de production constituées par les feuillus sociaux de plaine.

b) Principaux pathosystèmes forestiers

L'impact du changement climatique sur les pathosystèmes se traduit par de fortes extensions d'aires potentielles pour les espèces parasites dont la survie hivernale est limitée par les températures basses comme pour la maladie de l'encre, affectant chênes et châtaigniers (Bergot et al., 2004) et pour les parasites thermophiles en général. Dans le cas de l'oïdium

⁴ Modèle ORCHIDEE du Laboratoire des Sciences de l'Environnement et du Climat de l'Institut Pierre Simon Laplace (IPSL)

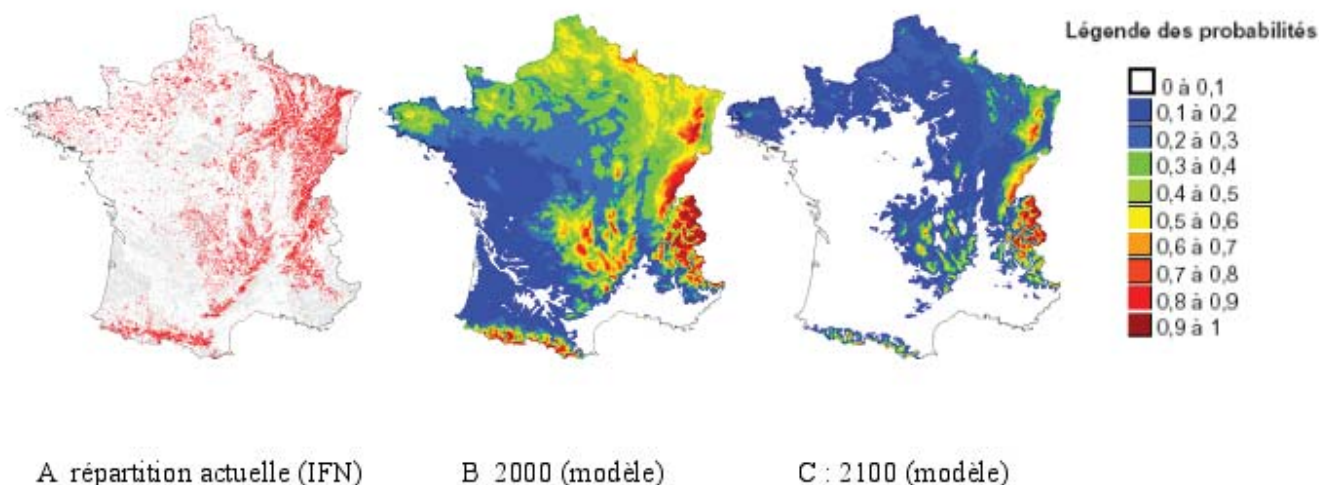


Figure 2 : Modélisation des changements de l'aire de répartition climatique potentielle du hêtre en France entre 2000 et 2100. On a représenté : (A) à gauche l'aire de répartition actuelle, telle qu'observée par l'Inventaire Forestier National ; (B) au milieu l'aire actuelle modélisée à partir des paramètres climatiques et (C) à droite l'aire climatique potentielle en 2100 dans

le cadre d'un scénario modéré d'augmentation de la température (scénario B2 des simulations Météo-France, +2°C en moyenne en France en 2100 par rapport à la période 1960-2000). On constate une forte contraction de l'aire potentielle du hêtre en France.

des chênes, le réchauffement pourrait se traduire, en se basant sur les projections actuelles, par une augmentation très importante du risque épidémique, passant de 10% à 50-70% des années dans le sud-ouest. Pour les rouilles du Peuplier, parasites polycycliques, une augmentation de 1°C conduit à un avancement de la date des premières infections de 11 jours se traduisant potentiellement en fin de saison par une augmentation de 30% de la proportion de tissus malades. Par contre, l'évolution du régime hydrique (baisse des précipitations pendant la saison de croissance) affecte très différemment les espèces parasites selon leur biologie. Les agents de maladies chroniques favorisées par les stress hydriques des plantes-hôtes, comme les chancres ou nécroses

corticales des racines, devraient voir leur impact augmenter, contrairement aux parasites fortement dépendants des précipitations pour leur développement, comme certains parasites foliaires. Il est à noter que les connaissances encore très fragmentaires sur les relations climat-maladies ne permettent pas de modéliser, aussi bien que pour les arbres, les évolutions fines résultant d'un changement climatique. Il est certain toutefois qu'une évolution du « paysage phytosanitaire forestier » est à attendre, avec notamment l'amplification de certaines maladies et l'apparition de nouvelles. La colonisation par certaines espèces parasites de nouvelles zones géographiques, en lien avec l'expansion de leurs aires bioclimatiques potentielles, pourrait les mettre en contact avec des

espèces hôtes « naïves » (n'ayant encore jamais eu de contact avec ces parasites), potentiellement très sensibles, comme cela a déjà été observé dans le cas d'épidémies résultant de l'introduction de parasites exotiques (chancre du châtaignier, graphiose de l'orme...).

BILAN DE CARBONE DE LA FORÊT FRANÇAISE

Le projet CARBOFOR a permis de calculer avec précision le rôle de la biomasse des forêts françaises dans le bilan de carbone de la France. Chaque année, le volume de bois sur pied (les arbres) dans ces forêts s'accroît de 35 millions de m³, ce qui représente un stockage de 17 millions de tonnes de carbone (MtC), soit l'équivalent de 15% de nos émissions annuelles de carbone fossile. Nos forêts jouent donc un rôle de « puits » dans le cycle du carbone. On retrouve une évolution tout à fait comparable dans le reste de l'Europe ou même de l'hémisphère Nord. Ainsi, ces forêts jouent un rôle régulateur en limitant la vitesse d'augmentation du taux de gaz carbonique atmosphérique. Si ces chiffres sont relativement sûrs pour les pays industrialisés, où des inventaires forestiers périodiques sont réalisés de longue date, la situation dans les pays de l'hémisphère Sud est plus difficile à appréhender. A l'échelle globale, on estime aujourd'hui, avec beaucoup d'incertitude, que la biosphère terrestre, principalement les forêts, réabsorbent un tiers environ des émissions de carbone dues à la combustion des sources d'énergie fossiles et aux changements d'utilisation des terres comme la déforestation tropicale.

A côté de ce rôle de stockage de carbone, les forêts permettent aussi d'éviter l'émission de carbone fossile par l'utilisation du bois-énergie en remplacement du charbon, du pétrole

ou du gaz, ou par l'utilisation du bois dans la construction qui permet de remplacer des matériaux plus « coûteux » en énergie fossile. En France, la consommation de bois-énergie est de près de 8 millions de tep (tonnes équivalent pétrole) par an, ce qui représente environ 8 Mt d'émissions de carbone fossile évitées.

a) Bilan de carbone actuel

D'un point de vue théorique, et à des échelles d'espace et de temps suffisamment larges, on pourrait considérer que les forêts ont un bilan de carbone nul : elles rejettent, par combustion ou décomposition du bois, autant de dioxyde de carbone qu'elles en absorbent par photosynthèse. Mais, en

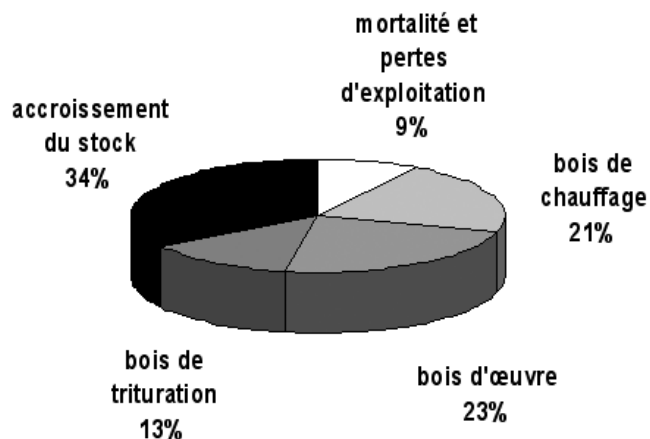


Figure 3. Utilisation du bois dans les forêts françaises. Deux points importants sont à remarquer : on ne prélève que deux tiers de l'accroissement, 34% restant en forêt et contribuant ainsi à une augmentation rapide du stock de bois, et donc de carbone, en forêt. Le prélèvement de bois de chauffage (principalement hors des circuits économiques classiques) représente 21% de la production biologique, l'une des valeurs les plus élevées en Europe. La forêt française est donc déjà fortement mise à contribution pour la production du bois-énergie. Source Dupouey et al. 1999.

pratique, cet équilibre n'est jamais observé. Dans les forêts gérées, le premier facteur à considérer est la balance entre la croissance biologique des forêts et les prélèvements de bois, par la sylviculture. Si le prélèvement est supérieur à la croissance, le stock de bois diminue et la forêt est donc une source de carbone. En France, nous avons pu calculer que le prélèvement est très largement inférieur à la croissance. Chaque année, on ne prélève environ que les deux tiers de la croissance (**Figure 3**) et la biomasse des forêts augmente donc très rapidement.

Les causes de ce déséquilibre sont multiples. La première est l'augmentation rapide des surfaces forestières : 73 000 ha supplémentaires chaque année de 1984 à 1996, qui représentent surtout des jeunes forêts en croissance rapide. En parallèle, la production biologique est en constante et forte augmentation depuis plusieurs dizaines d'années en partie à cause des modifications de l'environnement global telles que l'augmentation de la concentration atmosphérique en CO₂, l'augmentation des dépôts atmosphériques azotés ou l'augmentation de la température, provoquant en particulier un allongement de la période de végétation. Mais cet accroissement de la production est aussi directement lié aux activités humaines en forêt : substitution d'essences à croissance rapide (douglas, épicéa) aux essences feuillues, intensification de la sylviculture (fertilisation, travail du sol), arrêt progressif depuis le XIX^e siècle de pratiques anciennes épuisant les sols forestiers (enlèvement de la litière, exploitation intensive du bois de feu), rajeunissement des peuplements à la suite des plantations du Fonds Forestier National, utilisation de matériel génétique amélioré.

b) Bilan de carbone futur

Comment va évoluer dans l'avenir le rôle des forêts françaises dans le cycle du carbone et de quelle manière dépend-il du changement climatique ? On peut résumer ici les éléments aujourd'hui établis sur le futur des forêts métropolitaines. Parmi les facteurs qui joueront dans le sens d'un accroissement du stock de carbone des forêts, on trouve en premier lieu la stimulation de la productivité dans les zones limitées par le froid et où l'eau restera non limitante (zones de montagne par exemple) et, de façon globale, l'accroissement de la teneur en CO₂. D'autres facteurs peuvent venir diminuer, voire inverser cette tendance : augmentation des stress hydriques, dépérissement des espèces aux marges sud ou aux altitudes inférieures de leur aire de répartition, particulièrement pour le hêtre, le sapin ou l'épicéa, remplacement de forêts constituées d'essences à forte croissance (grand feuillus de plaine par exemple) par des espèces de plus faible productivité (essences plus méditerranéennes), exposition brutale à des pathosystèmes invasifs.

Plusieurs incertitudes demeurent. Le devenir du stock de carbone du sol, qui est du même ordre de grandeur que celui de la biomasse, reste très mal connu. Augmentera-t-il dans certaines zones, sous l'effet de l'augmentation de la productivité et donc des retours de carbone vers le sol, ou s'abaissera-t-il en raison de l'accroissement de l'activité des micro-organismes décomposeurs, liée à l'augmentation de la température ? Un autre facteur majeur d'incertitude pour les forêts françaises et européennes, majoritairement exploitées, sont les tendances lourdes, d'origine économique et sociale, qui affectent le mode d'utilisation des forêts, et donc leur stock de carbone. Ces tendances résultent en grande partie d'évo-

lutions historiques et de société externes à la forêt elle-même : augmentation de la productivité agricole entraînant un désintérêt pour les sols les moins fertiles, diminution considérable de l'utilisation de bois de feu comme source d'énergie dès lors qu'on a exploité les énergies fossiles. La vitesse d'accroissement des surfaces boisées, qui n'ont cessé d'augmenter depuis deux siècles, marque depuis quelques années un ralentissement. Ce facteur important de l'accroissement du stock de carbone forestier pourrait ainsi jouer un rôle moins important dans le futur. On constate une certaine impuissance des politiques forestières à contrôler ces évolutions : difficulté à limiter le défrichement face à une pression agricole forte (cas des pays en développement aujourd'hui) ou l'enfrichement (cas des régions méditerranéennes ou de montagne), difficulté à augmenter les prélèvements de bois dans les forêts françaises aujourd'hui peu exploitées. Il sera sans doute extrêmement difficile de contrôler les évolutions futures de ces facteurs. L'avenir du puits de carbone forestier reste donc aujourd'hui très incertain.

RÉFÉRENCES

- n Ciais et al. 2005. [Europe-wide reduction in primary productivity caused by heat and drought in 2003](#). *Nature*, 437 (7058) 22 Sept. 2005, p 529-533
- n Dufrêne E, Davi H, Francois C, et al. 2005. [Modelling carbon and water cycles in a beech forest Part I: Model description and uncertainty analysis on modelled NEE](#). *Ecological Modelling*, 185 (2-4): 407-436
- n Dupouey J.L., Pignard G., Badeau V., Thimonier A., Dhôte J.F., Nepveu G., Bergès L., Augusto L., Belkacen S., Nys C., 1999. [Stocks et flux de carbone dans les forêts françaises](#), C.R. Acad. Agr. Fr., 85, 6, 293-310.
- n Loustau, D., A. Bosc, et al. 2005. [Modeling climate change effects on the potential production of French plains forests at the sub-regional level](#). *Tree Physiology* 25(7): 813-823.
- n Loustau D, Granier A., Balesdent J., Disnar J-R, Déqué M., St André L., Pignard G., Dupouey J-L, Badeau V, Ciais P, Ogée J, Desprez-Loustau M-L., Dufrêne E., François C., Davi H. [Rapport Final du projet Carbofor](#). Ministère de l'Ecologie et du Développement durable, programme Gestion et Impacts du Changement Climatique, phase 1, GIP Medias France, <http://medias.obs-mip.fr/gicc/>, Toulouse.
- n Bergot M, Cloppet E, Pérarnaud V, Déqué M, Marçais B, Desprez-Loustau M-L. 2004. [Simulation of potential range expansion of oak disease caused by *Phytophthora cinnamomi* under climate change](#). *Global Change Biology*, 10 (9): 1539-1552 2004
- n Milne R. et Van Oijen M. 2005. [A comparison of two modelling studies of environmental effects on forest carbon stocks across Europe](#). *Annals of Forest Science*, 62, à paraître fin 2005.
- n Kramer, K. and Mohren G.M.J. (eds) 2001. [Long-term effects of climate change on carbon budgets of forests in Europe](#). Alterra Report 194, Rapport final du projet Européen (5e PCRD) LTEEF-2 (ENV4-CT97-0577), Wageningen. ISSN 1566-7197.

Pour en savoir plus :

Projet CARBOFOR : medias.obs-mip.fr/gicc/

Projet CARBOEUROPE : www.carboeurope.org

Observatoire Recherche – Environnement « F-ORE-T » :

www.gip-ecofor.org

Les déplacements des enveloppes climatiques :

www.nancy.inra.fr/extranet/com/carbofor/carbofor-D1-resume.htm

2.6 Impact sur l'agriculture

Bernard Seguin - Institut National de la Recherche Agronomique

Bernard Seguin est responsable de la Mission sur le Changement Climatique et l'Effet de Serre (MICCES) destinée à coordonner les travaux de l'INRA dans les domaines du changement climatique et de l'effet de serre. Il est membre du comité scientifique de GICC et du Conseil d'orientation de l'Observatoire National des Effets du réchauffement Climatique (ONERC). Il contribue aux travaux du Groupe de Travail 2 du GIEC et de la Commission de météorologie agricole de l'Organisation Météorologique Mondiale (groupe de travail sur les impacts du changement climatique).

MESSAGES CLÉS

- Les changements observés concernent l'avancée des stades phénologiques et des cycles cultureux. Peu ou pas d'évolution notable dans les systèmes de production et les pratiques culturales: le système a été capable d'absorber le réchauffement encore limité de l'ordre de 1°C.
- L'adaptation courante des techniques devrait permettre de limiter les impacts tant que ceux-ci resteront dans la gamme des 2 à 3°C. Au-delà, plutôt qu'à une rupture dans le rendement des productions, c'est à une accentuation du déplacement géographique des aires qu'il faudrait s'attendre, en accompagnement d'un bouleversement du paysage. Les terroirs en seraient plus fortement questionnés, et le problème de la compétition pour l'eau deviendrait primordial dans le sud.
- Le changement climatique générera des conditions, souvent plus favorables, parfois plus défavorables suivant les productions. Les grandes cultures et les prairies devraient être plutôt favorisées, sauf dans le sud où apparaît le risque de sécheresses accentuées, accompagnées de températures élevées. Les arbres fruitiers pourraient être exposés à des risques de gel accru au moment de la floraison. Pour la vigne, le réchauffement est plutôt gage de qualité et de régularité tant qu'il reste dans une gamme de 1 à 2°C. Au-delà, il risque de poser problème pour conserver la qualité et la typicité des productions traditionnelles.
- Sous réserve des impacts éventuels sur les mauvaises herbes et la santé des plantes, des effets plutôt positifs sont à attendre dans le nord. C'est dans la partie sud que devraient apparaître des effets négatifs, qui peuvent prendre une grande ampleur dans le cas de sécheresses répétées et persistantes.
- Une adaptation locale basée sur les composantes techniques (choix des variétés, pratiques culturales) paraît en mesure d'amplifier les effets positifs et de limiter les effets

négatifs, sous réserve que l'eau soit disponible pour l'irrigation.

- Un déplacement géographique vers le nord est à anticiper, mais il n'est pas envisageable pour les productions liées

INTRODUCTION

Le futur de l'agriculture française (et européenne) est à nouveau en question à travers les controverses sur l'avenir de la PAC (Politique Agricole Commune) et des subventions qui y sont liées. C'est évidemment un enjeu majeur, car l'économie gouverne majoritairement le choix des productions par les agriculteurs et les systèmes de culture ou d'élevage qu'ils sont amenés à mettre en œuvre dans ce cadre. La prise en compte des influences sur les nuisances environnementales et la santé des consommateurs sont maintenant au premier plan des préoccupations qui amènent à formuler les concepts d'une agriculture durable. Ceux-ci ne se limitent plus à la recherche d'une production optimisée pour assurer la seule nourriture de la population, mais doivent également répondre à la dimension de la multi-fonctionnalité de l'agriculture, devant assurer entre autre la préservation de l'espace rural. D'autres fonctions sont également émergentes, comme l'utilisation de la biomasse comme énergie renouvelable et, de façon plus large, la diminution de l'utilisation de l'énergie fossile (biocarburants, chimie verte, stockage de carbone). C'est dans ce contexte en pleine évolution que doit être appréciée la question de l'impact du changement climatique. Le texte qui suit se propose de donner les grandes lignes de ce qu'il peut être, mais il faudra garder à l'esprit que cet impact ne sera, au final, qu'une des composantes de cet ensemble en mutation.

au terroir, comme le sont les AOC. Des options stratégiques fortes devront être prises : soit favoriser le maintien des caractéristiques traditionnelles soit en tirant parti des nouvelles conditions.

LES CHANGEMENTS OBSERVÉS

La mise en évidence récente d'un réchauffement significatif non seulement à l'échelle du globe, mais également au niveau du territoire français, sur le siècle passé, amène à essayer d'évaluer les conséquences que l'on peut attribuer à ce réchauffement dans l'évolution récente des productions. Compte-tenu du poids déterminant des facteurs du progrès technique et du contexte économique, cela s'avère difficile, voire même impossible, sur l'ensemble du siècle. Par contre, l'accentuation notable du réchauffement depuis une vingtaine d'années permet d'identifier certains impacts vraisemblables. De manière générale, s'il est encore difficile d'évaluer son poids éventuel dans l'évolution récente des rendements, les agriculteurs (et les éleveurs) font état d'une modification des calendriers culturels qui pourrait être liée à cette particularité climatique. Elle est d'ailleurs confirmée par des analyses récentes sur les dispositifs expérimentaux de l'INRA (pratiquement un mois d'avance depuis 1970 sur les dates de semis du maïs pour quatre sites couvrant l'ensemble du territoire), ainsi que la tendance à un raccourcissement généralisé de la durée des cycles culturels. Par ailleurs, l'analyse des données phénologiques¹ sur les arbres fruitiers et la vigne, cultures à priori beaucoup moins dépendantes sur ce point des décisions tactiques des agriculteurs, a permis de mettre en évidence des avancements significatifs de stades tels que la floraison des arbres fruitiers (une dizaine de jours en trente

¹dates d'apparition des stades de développement

ans sur des pommiers dans le sud-est, Figure 1) ou la date de vendange pour la vigne (presque un mois dans la même région au cours des cinquante dernières années).

IMPACTS SUR LA PRODUCTION AGRICOLE

Avant d'en venir à l'impact du réchauffement climatique proprement dit, il est nécessaire de prendre en compte un effet spécifique aux couverts végétaux : la stimulation de la photosynthèse par l'augmentation du dioxyde de carbone (CO₂)

atmosphérique. Avec l'hypothèse d'un doublement du CO₂ atmosphérique pour la fin de ce siècle, les travaux permettent de prévoir une stimulation de la photosynthèse de l'ordre de 20 à 30 %, conduisant à une augmentation résultante de l'assimilation nette de l'ordre de 10 à 20 % (en prenant en compte l'augmentation de la respiration liée à l'effet de l'augmentation de la température). Par ailleurs, l'augmentation du CO₂ provoquant une diminution de l'ouverture des stomates², et donc de la transpiration, il faut s'attendre à une

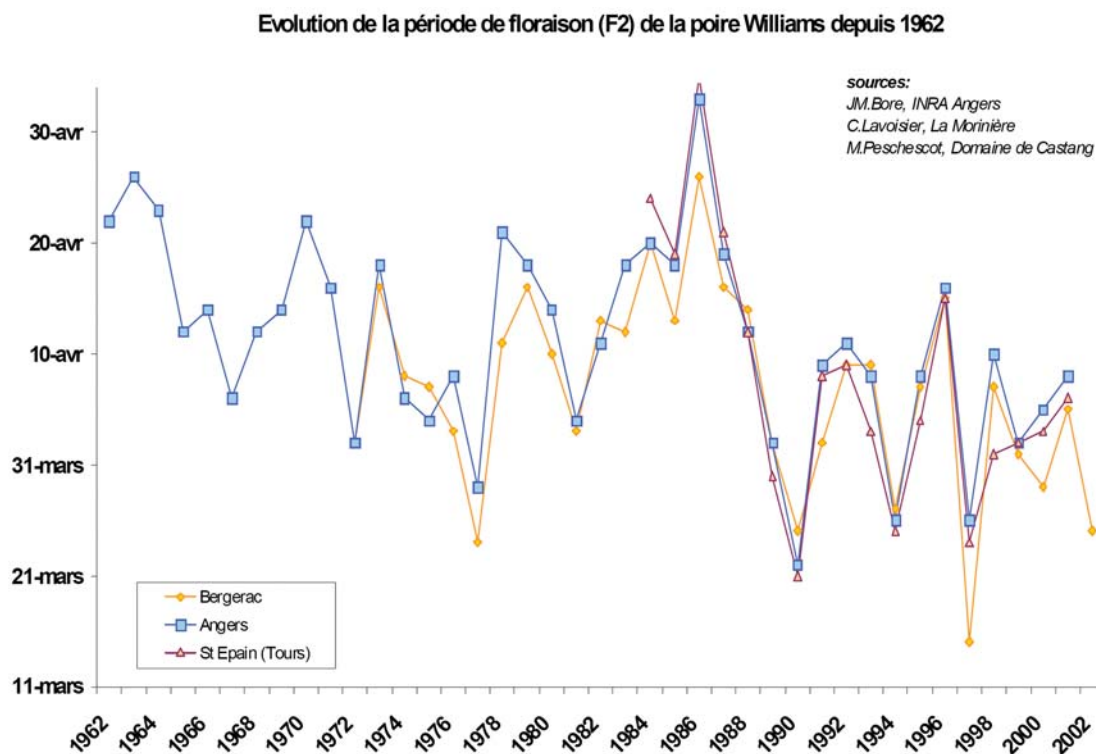


Figure 1 : Évolution de la période de floraison de la poire Williams depuis 1962 (à partir de la base de données Phenoclim). Sur 3 sites (Angers, Bergerac, Tours), il apparaît une avancée de la date moyenne de floraison de l'ordre de 2 à 3 semaines, avec une rupture significative dans les années 1985-1990 qui sépare nettement deux régimes stationnaires (malgré la forte variabilité inter-annuelle) avant 1985 et après 1990.

amélioration de l'efficacité de l'eau (masse d'eau nécessaire à la production d'une unité de biomasse).

Cet effet sur la photosynthèse sera combiné à l'effet propre du réchauffement climatique sur la température en premier lieu, mais également sur les autres facteurs, en particulier la pluie. Bien que la réponse physiologique des plantes à un enrichissement de l'atmosphère en CO₂ et à une augmentation concomitante de la température entraîne en théorie une production plus importante de biomasse, les effets sur le rendement des espèces cultivées, à l'échelle du peuplement, risquent d'être beaucoup plus contrastés. Cela est particulièrement vrai pour le sud, où l'optimum thermique pour la photosynthèse est souvent déjà atteint (par exemple pour le riz, dont la fertilité des épillets décroît fortement au-delà de 34 °C, ou pour le maïs, dont la viabilité du pollen baisse au-delà de 36°C), sinon dépassé dans certaines conditions. Dans les conditions tempérées, l'augmentation de température peut favoriser la plupart des processus physiologiques, mais elle aura également un impact négatif sur les cultures telles que pratiquées actuellement en accélérant leur rythme de développement et donc en raccourcissant les cycles de culture et, par suite, la durée de fonctionnement de l'usine photosynthétique. Au bout du compte, le bilan résultant en la production de biomasse peut prendre des aspects variés, en fonction du type de couvert et des conditions climatiques associées aux conditions culturales pour les plantes cultivées (Figure 2).

Au niveau des grandes cultures, les résultats des simulations effectuées avec les modèles de culture sur le blé et le maïs

Pour la vigne, la période de la maturation sera décalée après le 15 août à courant juillet, avec des conséquences certaines sur la qualité de la vendange (...)

permettent de conclure à des effets légèrement positifs sur le premier (avec des augmentations de rendement allant de 2.5 % à 5.7 %), et des effets plus variables sur le maïs (+ 10% à -16% dans le cas d'une culture irriguée dans le sud-est). Au niveau des prairies, la conjugaison de travaux expérimentaux et de modélisation conduit à envisager, dans les conditions du Massif Central, une augmentation de la production de biomasse aérienne de l'ordre de 25 % (dont 18 % attribuables au seul doublement de CO₂). En termes de système d'éleva-

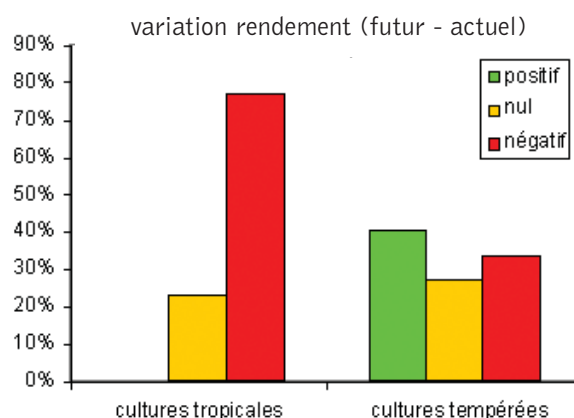


Figure 2 : Impact simulé du réchauffement à la fin du siècle sur le rendement des cultures à partir de 43 études répertoriées dans le 3ème rapport du GIEC. Il est majoritairement défavorable pour les cultures tropicales, et par contre contrasté pour les cultures tempérées

²Dispositif de l'épiderme des végétaux, situé notamment à la face des feuilles et parfois sur les tiges, percé d'un orifice appelé ostiole et servant aux échanges gazeux (transpiration et photosynthèse ou respiration) de la plante.

ge, la valorisation de cette augmentation de production devrait permettre une augmentation du chargement animal (environ 20%) ou une augmentation de la saison de pâture de l'ordre de trois semaines, avec un accroissement de l'ingestion de 7 à 20 % et de 2 à 20 % pour la production de viande.

En ce qui concerne les cultures pérennes (arbres fruitiers et vigne), le facteur primordial devrait être l'avancée des stades phénologiques, d'autant plus marquée que l'on s'éloigne en cours de saison de la levée de dormance³, qui risque d'être plus tardive à cause du manque de froid. Pour certaines espèces telles que l'abricotier, les hivers doux risquent même de créer des troubles physiologiques (chute de bourgeons, fruits avortés). Ensuite, l'action de la chaleur reprendra vite le des-

³Mécanisme physiologique permettant de cesser toute ou une partie d'activité pendant la mauvaise saison sous l'effet du froid, de la sécheresse, ou d'un éclaircissement insuffisant.

sus et l'avancée de la date de floraison peut conduire paradoxalement à augmenter le risque de gel (Figure 3), et à envisager des conditions climatiques moins favorables pour la fécondation et la pollinisation, en dépit du réchauffement des températures. Pour la vigne, la période de la maturation sera décalée après le 15 août à courant juillet, avec des conséquences certaines sur la qualité de la vendange, plus chargée en sucre (et donc en degré alcoolique) et moins en acide.

Il faut relativiser la portée de ces prévisions en notant que la disponibilité de l'eau peut devenir un facteur limitant prédominant, susceptible de fortement handicaper les cultures en cas de sécheresse forte et récurrente comme le montre l'expérience des années récentes, en particulier bien sûr 2003.

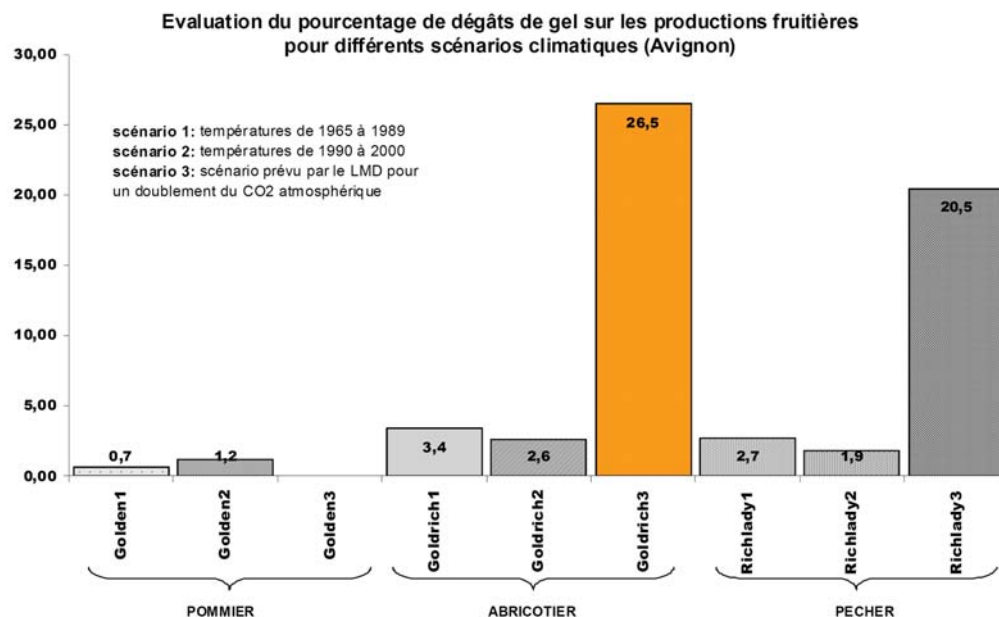


Figure 3 : Evaluation du pourcentage de dégâts de gel pour différents scénarios climatiques à Avignon. Les risques sont faibles pour les 3 cultures fruitières étudiées en considérant les données climatiques de la période 1965-1989, ainsi, que pour la période récente 1990-2000. Par contre, le scénario de réchauffement fait apparaître un risque significatif (de l'ordre de 20 à 25%) pour les arbres à floraison précoce (abricotier et pêcher), car l'avancée de la date de floraison les expose à des situations plus gélives malgré le réchauffement.

Par ailleurs, les éléments qui viennent d'être présentés s'appuient uniquement sur les valeurs moyennes des facteurs climatiques. L'éventualité d'événements extrêmes et, de façon plus large, la prise en compte de la variabilité de ces facteurs pourrait conduire à des impacts différents, par le dépassement de valeurs-seuils encore mal cernées. Enfin, il faudrait considérer l'impact sur les adventices (mauvaises herbes) et les insectes et maladies cryptogamiques, encore mal cernés à l'heure actuelle. Il a ainsi pu être constaté que, dans certains cas, le carpocapse⁴ des pommes est passé, dans le midi, de deux à trois cycles par an. A l'inverse, le phomopsis⁵ du tournesol a été, sans doute, limité ces dernières années dans le Sud-ouest par les fortes températures, et pratiquement éradiqué pour le moment par la sécheresse de 2003. Au-delà des bouleversements des systèmes écologiques complexes que représentent les relations entre hôtes et parasites (il est possible que les décalages de cycles en réponse à l'augmentation de température soient significativement différents pour les deux composantes). Il faut également prendre en compte la possibilité de mouvements géographiques qui amènent certaines maladies ou ravageurs, véhiculés par les moyens modernes de transport, à s'installer dans des régions où les conditions climatiques le leur permettront. Des recherches sont en cours pour établir, par exemple, le rôle du réchauffement sur l'apparition dans les serres du sud d'une aleurode⁶ (*Bemisia tabaci*).

Bien évidemment, les projections sur les impacts reposent sur la crédibilité des scénarios du futur. Si la perspective d'une augmentation significative de la température moyenne apparaît fortement probable, sa répartition saisonnière et sa variabilité, ainsi que la fréquence des extrêmes demeure un



sujet de questionnement, au même titre que les prévisions sur les pluies qui ont un impact tout aussi primordial. Pour le moment, et de façon schématique, il est permis de penser qu'un réchauffement limité (de l'ordre de 2°C) ne provoquerait qu'un léger déplacement d'équilibre, restant dans les limites des capacités d'adaptation presque traditionnelles : le siècle passé a bien surmonté des variations des températures estivales de l'ordre de + ou – 1°C, et la génétique a permis de remonter la culture du maïs-grain au nord de Paris par rapport à l'ancienne limitation géographique au sud-ouest ou dans certaines régions de Rhône-Alpes. Par ailleurs, les régions du nord pourraient même bénéficier de ce réchauffement.

Au-delà, il est difficile de cerner les conséquences d'un réchauffement avoisinant les 4 à 5°C. Les travaux effectués dans le cadre du projet GICC- Seine avec le scénario A2

⁴Le carpocapse (*Laspeyresia pomonella*) est un papillon dont la larve se nourrit de la chair des fruits

⁵Le phomopsis est une maladie du tournesol induite par le champignon *Phomopsis helianthi*.

⁶L'aleurode est le principal ravageur de la tomate. L'espèce la plus répandue en cultures sous serres est *Trialeurodes vaporariorum*. *Bemisia tabaci* est une autre espèce de taille plus petite.

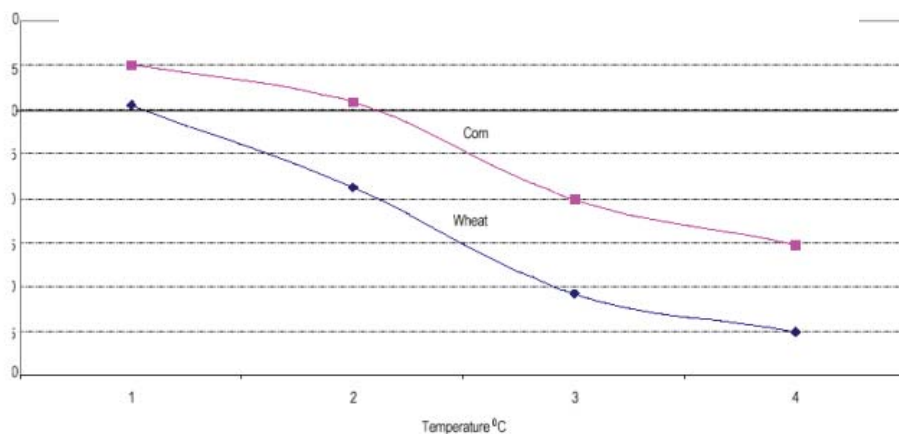


Figure 4 : Effet du réchauffement sur le rendement du blé et du maïs en zone tempérée à partir des études répertoriées dans le 3ème rapport de l'GIEC (d'après Easterling and Apps 2005). Sans adaptation, si le maïs (plante d'origine tropicale) bénéficie d'un réchauffement modéré jusqu'à 2°C, le blé est moins favorisé, et les deux cultures seraient affectées de baisses de rendement de l'ordre de 10% pour le maïs et de 20% pour le blé pour un réchauffement de 3 à 4°C.

montrent une limitation plus forte de la stimulation du CO₂ sur la photosynthèse, mais avec des effets sur le rendement peu marqués. Ils sont d'ailleurs en accord avec les synthèses au niveau mondial, qui diagnostiquent des baisses de rendement plus fortes pour le blé et le maïs, sans faire cependant apparaître de rupture véritable (Figure 4). L'effet direct de l'augmentation de température serait sans doute plus fort sur la production viticole et le terroir. Mais le principal bouleversement serait sans doute à attendre de l'accentuation de la sécheresse estivale, en particulier pour la partie sud de l'hexagone. L'exemple de l'été 2003 a montré un impact très significatif, plus fort que celui des températures élevées de l'épisode de canicule, même s'il est difficile de séparer les deux. Sur un épisode isolé, les conséquences à court terme ont pu être réduites, mais la perspective d'un retour fréquent de tels épisodes met au premier rang des préoccupations les tensions vraisemblables sur la ressource hydrique et la compétition de l'irrigation avec les autres usages.

LES MOYENS D'ADAPTATION

Les perspectives présentées plus haut ont considéré les systèmes tels qu'ils sont pratiqués actuellement. Toutefois, en admettant implicitement leur stabilité géographique, une marge appréciable d'adaptation apparaît possible en mobilisant l'expertise agronomique au sens large pour les adapter aux conditions climatiques modifiées (recours au matériel génétique approprié, mise au point d'itinéraires techniques adaptés, ajustement de la fertilisation et de l'irrigation, etc...). De façon générale, on peut estimer que l'adaptation des grandes cultures pourrait s'effectuer sans trop de problèmes, dans la mesure où les années passées ont montré la capacité des agriculteurs à les faire évoluer rapidement en fonction, en particulier, des contraintes résultant de la PAC. De même pour les prairies et l'élevage. Il faut cependant relativiser cette vision optimiste sur une capacité d'ajustement rapide (quelques années), en soulignant une fois de plus les incertitudes actuelles sur la pluviométrie et le bilan hydrique. Pour les cultures pérennes, si le diagnostic sur l'adaptation

des systèmes de culture reste identique dans ses grandes lignes, la capacité d'adaptation paraît moins forte. Elle nécessite de prendre en compte une durée plus longue, de l'ordre de dix à vingt années. D'ores et déjà, pour les arbres fruitiers, devant les évolutions phénologiques constatées, il faut se préoccuper maintenant du choix du matériel végétal adapté. Quant à la vigne, s'il est possible d'envisager de nouveaux cépages, ou des modifications des pratiques culturales, elle pose des problèmes spécifiques, à cause du lien au terroir, qui seront abordés dans le paragraphe suivant.

Un deuxième niveau d'adaptation passe par un déplacement géographique des zones de production ou de plantation. A l'heure actuelle, il n'apparaît pas de signe tangible de déplacement géographique des systèmes de production. Et pourtant, le réchauffement observé sur le siècle passé équivaut à un déplacement vers le Nord de l'ordre de 180 km ou en altitude de l'ordre de 150 m. Ce qui traduit la plasticité déjà évoquée, mais jusqu'où ou jusqu'à quand ? On peut donc légitimement envisager l'éventualité de la remontée (vers le Nord ou en altitude) de certaines cultures, ou l'introduction de nouvelles cultures au Sud. Dans le cas d'un réchauffement modéré, ce déplacement resterait limité. Mais, avec une hypothèse de 4 à 5°C, le réchauffement équivaldrait à une remontée vers le nord de presque 1000 km, soit l'ensemble du territoire. Dans l'hypothèse de tels déplacements géographiques, la nature du lien avec le caractère local jouera un grand rôle : s'il apparaît possible, a priori, de cultiver du blé ou du maïs dans des régions différentes, cela n'irait pas de soi pour les productions plus typées (au premier rang, évidemment la vigne) dont une grande partie de la valeur ajoutée provient de l'existence d'une zone d'appellation ou d'un terroir. Dans la

mesure où la notion de terroir implique une étroite adéquation entre le milieu physique (sol et climat), les variétés (cépages pour la vigne) et les techniques culturales, elle implique évidemment un risque de fragilité particulière par rapport à une évolution du climat. Les A.O.C ne se délocalisent pas ! L'année 2003 a été plutôt rassurante sur ce point : même s'il apparaît qu'elle a conduit à un millésime contrasté et particulier, et si la conjonction de la sécheresse et de la canicule a eu des effets néfastes par certains aspects, la vigne a démontré une capacité certaine d'adaptation à ces conditions exceptionnelles.

RÉFÉRENCES

- n Bethenod O., Ruget F., Katerji N., Combe L., Renard D., [Impact of atmospheric CO2 concentration on water use efficiency of maize. Maydica 46 \(2001\), 75-80.](#)
- n Chuine I., Yiou P., Viovy N., Seguin B., Daux V., Le Roy Ladurie E. [Back to the Middle Ages ? Grape harvest dates and temperature variations in France since 1370. Nature, \(2004\) 432,289-290.](#)
- n Delecolle R., Soussana J.F., Legros J.P., [Impacts attendus des changements climatiques sur l'agriculture française. C.R.Acad.Agric.Fr 85 \(1999\), 45-51.](#)
- n Domergue M., Garcia de Cortazar I., Seguin B., Brisson N., Ripoche D., [Le réchauffement récent du climat en France et ses conséquences sur l'agriculture. Actes du XVIème colloque de l'Association Internationale de Climatologie, Varsovie \(Pologne\), 10-14 septembre 2003. Blazejczyk K., Adamczyk A.B. \(eds.\), Acad. Pol. Sci., doc. geogr 39 \(2003\), 85-88.](#)
- n Domergue M., Legave J.M., Calleja M., Moutier N., Brisson N., Seguin B. [Réchauffement climatique : quels effets sur la floraison chez trois espèces fruitières ? Arboriculture fruitière, \(2004\) , 578, 27-33.](#)

n Easterling W., Apps M.. Assessing the consequences of climate change for food and forest resources : a view from IPCC. Climatic change, (2005), 70, 165-189

n Ewert F., van Oijen M, Porter J.R., Simulation of growth and development processes of spring wheat in response to CO2 and ozone for different sites and years in Europe using mechanistic crop simulation models. Eur. J. Agron 10 (1999), 231-247.

n Ganichot B., Evolution de la date des vendanges dans les Côtes du Rhône méridionales. Actes des 6èmes Rencontres Rhodaniennes. Institut Rhodanien. Orange, France (2002), 38-41.

n GIEC / IPCC, Climate change 2001: impacts, adaptation and vulnerability, Contribution of Working Group II to the third assessment report of IPCC. Cambridge University Press, Cambridge (2001).

n Juin S., Brisson N., Clastre P., Grand P., Impact of global warming on the growing cycles of three forage systems in upland areas of southeastern France. Agronomy for sustainable development, (2004), 24,327-338.

n Le Roy Ladurie E., Histoire du climat depuis l'an mil. Flammarion, Paris (1983).

n Lobell D.B., Asner G.P., Climate and management contributions to recent trends in U.S. agricultural yields. Science 299 (2003), 1032.

n Olesen J.E, Bindi M. Consequences of climate change for European agricultural productivity, land use and policy, Eur.Journ.Agronomy, (2002), 16, 239-262.

n Perarnaud V., Seguin B., Malezieux., Déqué M., Loustau D. Agrometeorological research and applications needed to prepare agriculture and forestry adapt to 21st century climate change. Climatic change, (2005), 70, 319-340.

n Polley H.W., Implications of atmospheric and climatic change for crop yield and water use efficiency. Crop Science 42 (2002), 131-140.

n Reddy K.R., Hodges R.F., Climate change and global crop productivity. CABI Publishing, Wallingford (2000).

n Rosenzweig C., Hillel D., Climate change and the global harvest. Oxford University Press, Oxford (1998).

n Ruget F., Bethenod O., Combe L., Repercussions of increased

atmospheric CO2 on maize morphogenesis and growth for various temperature and radiation levels. Maydica 41 (1996), 181-191.

n Seguin B., Adaptation des systèmes de production agricole au changement climatique. CRAS Geoscience 335/6-7 (2002), 569-575.

n Seguin B., Stengel P. (2002). Changement climatique et effet de serre. INRA Mensuel, dossier n° 113, juin 2002, 20 pp.

n Seguin B., Baculat B., Baret F., Brisson N., Huard F., Ruget F., An overview of the consequences of the 2003 summer for agriculture in France. Proceedings of the 8th European Society of Agronomy congress. Copenhagen (Denemark), 11-15 juillet 2004. ESA (2004), 335-336.

n Seguin B., Domergue M., Garcia de Cortazar I., Brisson N., Ripoche D. Le réchauffement climatique récent : impact sur les arbres fruitiers et la vigne. Lettre pigb-pmrc France Changement global, (2004),16, 50-54

n Seguin B., Stevez L., Herbin C., Rochard J. Changements climatiques : perspectives pour la viticulture. 2ème partie : conséquences potentielles d'une modification du climat pour la viticulture. Revue des œnologues, (2004),111, 59-60

n Seguin B., Garcia de Cortazar.I , Climate warming : consequences for viticulture and the notion of terroirs in Europe. Acta Horticulturae (2005, à paraître)

n Seguin B., Brisson N., Loustau D., Dupouey J.L. Impact du changement climatique sur l'agriculture et la forêt. In 'L'homme face au climat', actes du symposium du Collège de France, Paris, 12-13 oct 2004, ed Odile Jacob (2005, à paraître).

n Soussana J.F., Changement climatique. Impacts possibles sur l'agriculture et adaptations possibles. In : Demeter, Armand Colin, Paris (2001), 195-222.

Pour en savoir plus

Agence Environnementale Européenne: www.eea.eu.int
Mission sur le changement climatique et l'effet de serre:
www.avignon.inra.fr/MICCES

2.7 Impact sur la santé

Jean-Pierre Besancenot - Laboratoire Climat et Santé, Faculté de Médecine de l'Université de Dijon

Jean Pierre Besancenot est Directeur de Recherche au CNRS et co-auteur du chapitre consacré à la santé dans le rapport de la Mission Interministérielle de l'Effet de Serre (MIES) sur les Impacts potentiels du changement climatique en France au XXIème siècle (1998, rééd. 2000) ; membre du Groupe de travail de l'Office Parlementaire d'Évaluation des Choix Scientifiques et Technologiques pour la rédaction du rapport sur l'évaluation de l'ampleur des changements climatiques, de leurs causes et de leur impact sur la géographie de la France à l'horizon 2025, 2050 et 2100 (2002) ; relecteur auprès du GIEC.

MESSAGES CLÉS

- La santé étant dans une large mesure sous la dépendance du climat, il faut s'attendre à ce que tout changement climatique ait des impacts (favorables ou défavorables) sur la santé. Les impacts indirects (maladies à vecteurs) sont a priori devancés par les effets directs (stress thermique).
- Sans être nul, le risque d'émergence ou de réémergence dans un pays comme la France de maladies à vecteurs en provenance des pays tropicaux doit être fortement relativisé (paludisme, dengue, fièvre jaune...). S'il y a malgré tout apparition ou résurgence de telles maladies, le rôle du changement climatique sera sans doute minime en regard d'autres déterminants, comme la multiplication des transports aériens.
- Les inquiétudes liées aux effets directs du stress thermique sur l'organisme humain paraissent beaucoup plus fondées. Un réchauffement modéré ($\pm 2^{\circ}\text{C}$ en moyenne annuelle) aurait des effets bénéfiques en hiver, mais entraînerait

une légère augmentation de la mortalité estivale. Un réchauffement plus important ($< 3^{\circ}\text{C}$ en moyenne annuelle) n'abaisserait pas davantage la morbidité et la mortalité de saison froide, mais accentuerait la mortalité de saison chaude au point de la rendre prépondérante sur l'année.

- La multiplication des grands paroxysmes thermiques serait plus préjudiciable que le relèvement de la valeur moyenne des températures. Le vieillissement de la population constituera un facteur croissant de vulnérabilité face au climat.
- Ces résultats doivent être considérés avec prudence car la santé est par essence un phénomène multifactoriel, et les impacts du changement climatique ne peuvent pas être raisonnablement cernés hors de leur contexte démographique, social et économique. Mais prudence ne veut pas dire passivité et la mise en place d'un dispositif de surveillance épidémiologique paraît d'ores et déjà souhaitable.

INTRODUCTION

Chacun sait depuis Hippocrate que la santé humaine est sous la dépendance des facteurs d'environnement en général, et du contexte climatique en particulier. Si le climat change – et le consensus est de plus en plus large à ce sujet –, il faut s'attendre à des impacts multiples sur notre santé (Figure 1). La canicule de l'été 2003, perçue à tort ou à raison comme l'une des premières manifestations du changement climatique annoncé, a provoqué une vive prise de conscience du phénomène et suscité de légitimes préoccupations. Mais l'opinion se focalise souvent sur de faux problèmes ou sur des risques extrêmement ténus, alors qu'il est de vrais motifs d'inquiétude dont on ne parle quasiment pas. L'irrationnel étant le compagnon permanent des incertitudes et de la peur, il paraît nécessaire de tenter un bilan dépassionné, affranchi de tout parti pris militant. **(FIGURE 1)**

À cet égard, il conviendra de distinguer avec soin, parmi les effets possibles d'un réchauffement climatique, ceux qui s'exerceraient directement sur l'organisme humain et ceux qui se feraient sentir en façonnant des conditions écologiques plus ou moins favorables à la survie, à la multiplication et au développement de tel ou tel germe pathogène, ou de tel ou tel insecte vecteur de ce germe. C'est par ce dernier point que l'on commencera.

LES EFFETS INDIRECTS D'UN RÉCHAUFFEMENT CLIMATIQUE SUR LA SANTÉ

C'est essentiellement via les vecteurs de microorganismes pathogènes que le climat peut intervenir sur la répartition des maladies infectieuses ou parasitaires. Un changement climatique modifiant les conditions écologiques de telle ou telle

partie du territoire national serait en effet susceptible d'induire une évolution de la nature et des caractéristiques des populations d'insectes, avec apparition d'espèces jusqu'alors exotiques. Il pourrait en résulter un risque non négligeable de réapparition d'épidémies ou, éventuellement, un risque de pérennisation de phénomènes aujourd'hui saisonniers, voire exceptionnels (P. Martens, 1998).

(...) l'opinion se focalise souvent sur de faux problèmes ou sur des risques extrêmement ténus, alors qu'il est de vrais motifs d'inquiétude dont on ne parle quasiment pas

Le paludisme est l'une des maladies que l'on prétend les plus sensibles aux conditions thermo-hygrométriques. Il est dû à un parasite du genre *Plasmodium*, transporté dans la salive du moustique anophèle femelle. Les anophèles prolifèrent en ambiance chaude et humide. Ils se reproduisent à proximité de l'eau, dans les zones marécageuses et les mares. Le temps nécessaire au développement du parasite dans le corps du vecteur dépend de l'espèce et de la souche du parasite, ainsi que de l'espèce et de la souche du moustique, mais aussi de la température et de l'humidité ambiantes. Dans ces conditions, on conçoit que la répartition géographique de la maladie puisse se trouver affectée par un réchauffement climatique, qui pourrait augmenter le niveau de transmission en un lieu donné et permettre la transmission dans des régions où elle était auparavant rendue impossible par des températures

trop basses. Il en résulterait une extension en latitude de la zone d'endémie. Des craintes sont ainsi permises pour le nord du Sahel, pour la majeure partie du Maghreb, pour la Turquie, pour le Proche et le Moyen-Orient, ainsi que pour

l'Afrique du Sud, pour le Yucatan et le centre-est du Mexique, pour le Brésil méridional ou pour le sud de la Chine. Un autre risque est celui d'une extension de la maladie vers des altitudes plus élevées, alors qu'aujourd'hui les montagnes tropica-

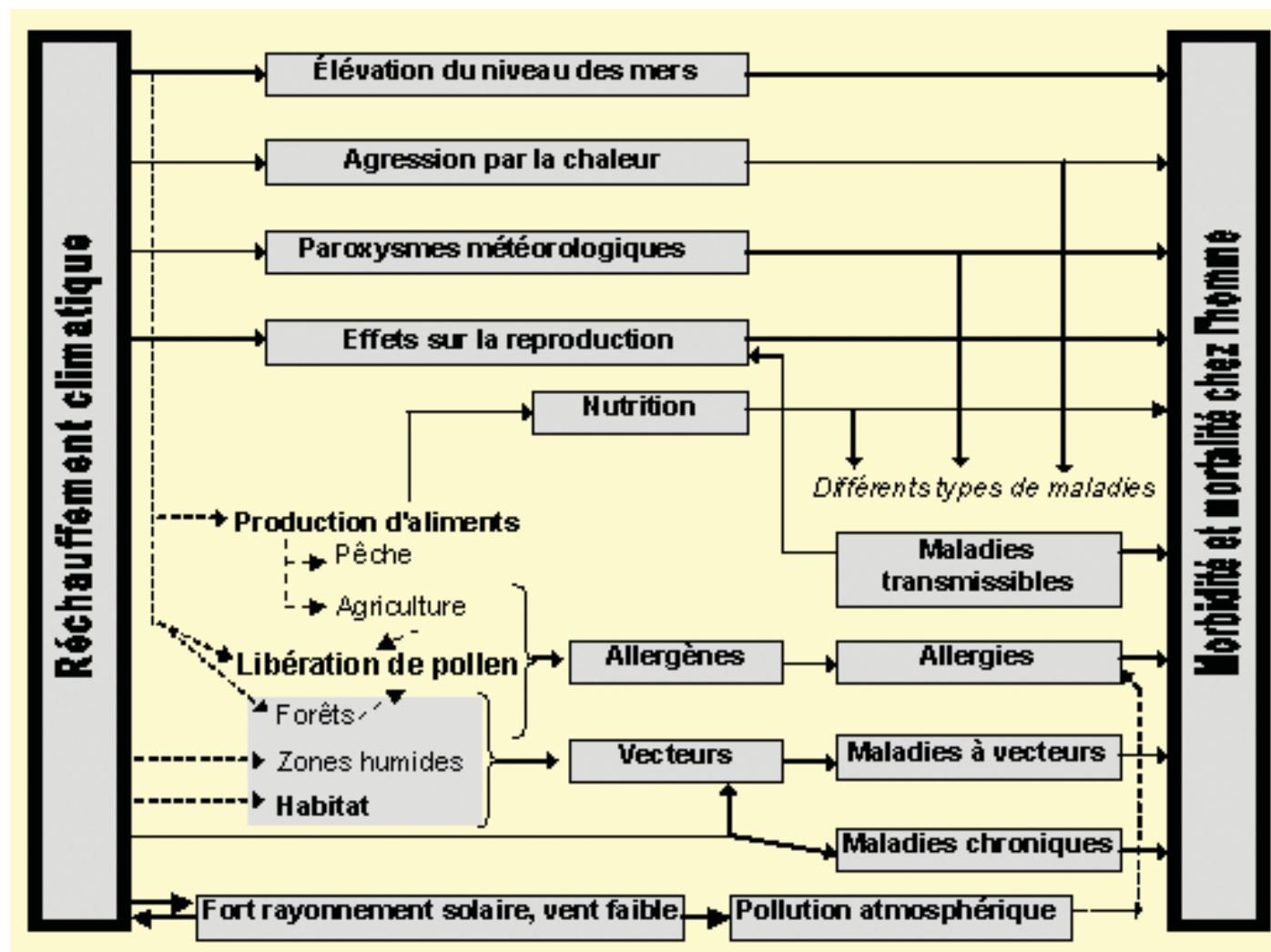


Figure 1 : Quelques-uns des impacts potentiels du changement climatique sur la santé [en partie d'après www.x-environnement.org/Jaune_Rouge/JR00/besancenot.html].



les sont indemnes. Il s'ensuit que si, en 1990, 45% de l'humanité vivait dans des régions où sévit le paludisme, le taux pourrait atteindre 60% en 2050.

Mais qu'en est-il aux latitudes moyennes, et spécialement en France ? Il ne faut pas oublier que la maladie y a sévi jusqu'au début, voire au milieu du XX^{ème} siècle et que, si elle a été éradiquée, ce n'est pas à la suite d'un refroidissement, mais grâce à la lutte antivectorielle, ainsi qu'à l'assainissement des zones humides et des marais. Ce n'est donc pas le climat qui constitue un facteur limitant et l'on se trouve aujourd'hui dans la situation où la présence de vecteurs potentiels n'entraîne plus la transmission de la maladie. On ajoutera que des cas cliniques de paludisme importé sont régulièrement signalés aux abords des aéroports internationaux, sans qu'il en résulte la moindre flambée épidémique. Seul un apport massif de parasites, d'une souche compatible avec les moustiques locaux, pourrait occasionner une reprise de la transmission. Mais dans cette éventualité, il est probable que la réintroduction de la maladie serait aussitôt détectée, donc assez facilement maîtrisée. Il s'ensuit que, sans être nul, le risque reste minime, pour ne pas dire infime. Étant donné le niveau de vie et les structures sanitaires de pays comme la France, l'importation de vecteurs ne s'accompagnerait pas nécessairement d'épidémies, loin s'en faut. À l'inverse, de vives inquiétudes sont permises, avec ou sans changement climatique, pour des pays où le système de santé souffre d'une désorganisation telle que ni la surveillance épidémiologique ni le contrôle des populations de vecteurs ne sont correctement assurés ; tel est, par exemple, le cas d'une bonne partie du territoire de l'ex-URSS. On saisit par là combien le

paludisme reste lié au niveau socio-économique des populations, plus qu'au climat (F. Rodhain, 2000).

Ce qui vaut pour le paludisme peut être transposé, mutatis mutandis, à la majorité des maladies à transmission vectorielle. À ce jour, on ne dispose d'aucun exemple probant de colonisation durable de zones tempérées par des vecteurs d'origine tropicale. Certes, la multiplication incessante des transports aériens crée un risque majeur de dispersion, qu'il s'agisse de transport actif (cas des moustiques pénétrant d'eux-mêmes dans des avions) ou de transport passif (cas des tiques voyageant dans le pelage des animaux de compagnie et qui ré-envahissent ensuite de vastes territoires). Mais si ces arthropodes voyagent, ils sont généralement incapables ensuite de faire souche en climat tempéré, ce qui impliquerait le développement des gènes permettant de se mettre en état végétatif pour faire face aux rigueurs de l'hiver. L'immense

(...) si, en 1990, 45% de l'humanité vivait dans des régions où sévit le paludisme, le taux pourrait atteindre 60% en 2050.

majorité d'entre eux disparaît alors sans suite ... si ce n'est, éventuellement, après avoir piqué et infecté quelques personnes, qui se comporteront en impasses épidémiologiques. La ré-introduction des moustiques vecteurs de la fièvre jaune et de la dengue fait ainsi partie des hypothèses assez couramment avancées, mais sans arguments sérieux. Si la dengue est aujourd'hui en extension à la surface du globe, et particulièrement ses formes graves (hémorragiques), on voit mal en

quoi un réchauffement pourrait intervenir.

Le cas des maladies dont le vecteur est déjà présent en milieu tempéré, domaine méditerranéen inclus, incite à beaucoup plus de prudence. On se limitera à deux exemples :

a) **Le premier concerne les leishmanioses.** Ces maladies parasitaires transmises par la piqûre des phlébotomes femelles (petits moucheron velus, actifs au crépuscule et durant la nuit) se présentent sous deux formes, l'une cutanée, le plus souvent bénigne, l'autre viscérale, presque toujours mortelle en l'absence de traitement ; le chien en constitue le réservoir principal. Cette forme viscérale, fréquente sur le pourtour méditerranéen avec des foyers dans les Cévennes, en Provence et en Corse, voit actuellement son incidence progresser dans le cadre de co-infections avec le VIH. Le réchauffement planétaire n'y est pour rien mais, dans l'avenir, la remontée vers le nord du climat de type méditerranéen pourrait transformer des microfoyers instables en zones infectées homogènes. C'est ainsi que le Piémont italien, indemne il y a trente ans, est à présent largement contaminé, jusqu'en Val d'Aoste. De même, en France tout le triangle Andorre-Nice-Lyon pourrait être rapidement infesté. Des modèles d'évolution climatique indiquent la possibilité de foyers jusque dans le sud du Royaume-Uni vers 2030. Le risque est donc élevé, d'autant que d'autres facteurs ont une forte probabilité d'agir dans le même sens que le changement climatique, qu'il s'agisse de la croissance de la population canine ou des changements de comportement des hommes (développement de la périurbanisation, contacts plus fréquents des citadins avec la nature, intensification des déplacements entre le nord et le sud...).

b) **L'autre exemple est celui de la fièvre dite du Nil occidental,** provoquée par le virus West Nile, dont les oiseaux constituent l'unique réservoir. Le virus est transmis, aux hommes

(...) les fortes chaleurs entraînent
une recrudescence de diverses mal-
adies potentiellement mortelles (...)

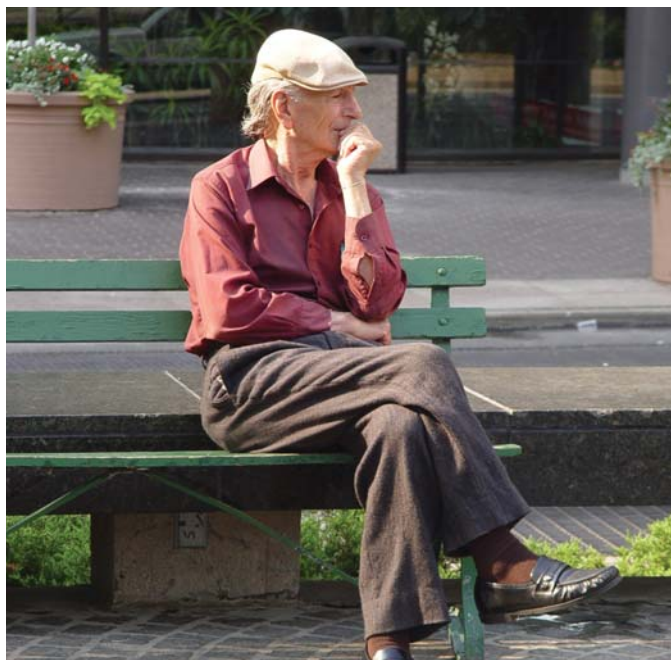
comme aux équidés, par la piqûre de diverses espèces de moustiques, principalement des *Culex*, largement présents en Camargue, mais aussi *Aedes albopictus*, naguère inféodé au continent asiatique et qui a récemment essaimé un peu partout à la surface du globe, et désormais présent en France. Le réchauffement a été aussitôt mis en cause. Mais comme ce moustique vit très bien à Pékin, force est d'admettre qu'il est capable de s'adapter à des hivers rudes : le climat n'est probablement pour rien dans sa dissémination, qui serait liée avant tout au commerce international des pneus pour le rechapage. Les larves se développent très bien dans les pneus exposés à la pluie et les œufs peuvent y persister, à sec, pendant plusieurs mois. On n'ira pas jusqu'à dire que le changement climatique n'a rien à voir dans la multiplication récente des épidémies de West Nile, mais il agit sans doute moins sur les vecteurs que sur le réservoir du virus, en l'occurrence les oiseaux dont les migrations ont tendance à remonter de plus en plus loin vers le nord, tendance qui pourrait s'accroître sous l'effet d'une élévation des températures.

Pour parer à ces différents risques, trois conditions sont requises : le renforcement des contrôles sanitaires aux fron-

tières, la mise en place de systèmes de surveillance épidémiologique et de veille sanitaire, enfin la réactivation d'un inventaire permanent des insectes présents sur notre territoire. Il n'empêche que, dans les pays développés des latitudes moyennes, le risque infectieux et parasitaire reste largement devancé par les méfaits directs du stress thermique.

LES EFFETS DIRECTS D'UN RÉCHAUFFEMENT CLIMATIQUE SUR LA SANTÉ

Différentes simulations ont porté sur le nombre des décès. On sait que le rythme annuel de la mortalité, hors des tropiques, est le plus souvent caractérisé aujourd'hui par une culmination principale de saison froide (renforcée en présence d'un hiver rigoureux) et par un maximum secondaire de saison chaude (particulièrement saillant durant les périodes canicu-



lares). Dans l'hypothèse d'une intensification de l'effet de serre, il faudrait s'attendre à une diminution relative de la surmortalité hivernale, les maladies respiratoires et cardiaques contribuant le plus à cette amélioration. À l'inverse, les nouvelles dispositions thermiques détermineraient une assez franche surmortalité estivale. Celle-ci résulterait assurément de la mise en échec des mécanismes assurant le maintien de la température interne autour de 37°C (hyperthermie, coup de chaleur...). Mais l'examen des canicules récentes nous enseigne que sur dix décès en surnombre, sept au moins ne résultent pas directement d'une mise en échec de ces mécanismes. C'est que la chaleur peut aussi aggraver une maladie déjà installée ou contribuer à la déclencher et, de même que les grands froids ne se bornent pas à tuer par hypothermie quelques dizaines de sans abri, de même les fortes chaleurs entraînent une recrudescence de diverses maladies potentiellement mortelles, qu'elles soient cardiovasculaires, respiratoires, métaboliques (diabète), psychiques ou autres.

Toute la difficulté est de savoir quelle serait alors la résultante des évolutions opposées caractérisant les saisons extrêmes. Il semble que cela dépende avant tout de l'intensité du réchauffement et plusieurs scénarios doivent alors être envisagés.

a) Dans l'hypothèse d'une augmentation de l'ordre de 1,5°C de la température moyenne de la France sur la période 2070-2099, par rapport à la période 1960-1989 - ce qui n'est pas jugé le plus plausible par les spécialistes -, l'impact sur la mortalité (Figure 2a et 2b) resterait insignifiant.

b) En présence d'un réchauffement moyen de 2 à 2,5°C, un

peu moins l'hiver (+1,5 à 2°C en hiver, + 2,5 à 3°C en été) - ce qui correspond au scénario B2 du GIEC -, l'extrapolation des situations réalisées au cours des hivers les plus doux et des étés les plus chauds du dernier demi-siècle indique que le nombre des décès pourrait reculer d'entre 5 et 7% au cours du trimestre décembre-février et augmenter d'autant (ou d'une valeur très légèrement supérieure : 6 à 10%) au cours des mois de juin à août, alors qu'il ne resterait stable au printemps et en automne (Figure 2c). Le bilan net, sur l'année, ne serait pas affecté mais on assisterait d'un mois à l'autre à une certaine égalisation du nombre des décès.

c) Enfin, dans l'hypothèse d'un relèvement de 3 à 3,5°C de la

(...) l'évolution climatique (...) se traduirait également par une augmentation du nombre des décès et par une diminution corrélative de l'espérance de vie.

température moyenne (+2,5 à 3°C en hiver, + 4 à 5°C en été) - ce qui suit le scénario A2 du GIEC -, la mortalité de saison froide ne serait pas plus abaissée que dans le cas précédent, mais la mortalité de juillet-août serait majorée d'au moins 12 à 18% (Figure 2d). Ce qui interviendrait alors le plus n'est pas la hausse "moyenne" de la température, mais la multiplication des phénomènes météorologiques extrêmes qui, selon la plupart des modèles, pourraient marquer l'évolution du climat dans la deuxième moitié du XXIème siècle. Du côté de la chaleur, il faut s'attendre à une probabilité multipliée

par 5 à 10 de voir dépasser le seuil des 35°C, même si le seuil des 45°C n'a qu'un risque infime d'être franchi sur le territoire français. Cette fréquence accrue des phénomènes caniculaires est susceptible d'entraîner de dramatiques épisodes de surmortalité, à l'image de ce que la France a vécu durant l'été 2003. C'est là sans doute que réside le plus inquiétant pour l'avenir.

Toutes choses égales par ailleurs, l'évolution climatique se traduirait donc par une inversion du rythme annuel de la mortalité (J.P. Besancenot, 2000). Elle se traduirait également par une augmentation du nombre des décès et par une diminution corrélative de l'espérance de vie. Seraient alors spécialement touchées les catégories sociales les moins favorisées (isolées, vivant dans des logements mal isolés et mal ventilés, dépourvues de toute installation de conditionnement d'air et souffrant souvent de polypathologies intriquées), ainsi que les femmes (lesquelles, au-delà de la soixantaine, règlent moins efficacement que les hommes leur température interne).

Encore le développement de phénomènes d'adaptation est-il susceptible, sinon de neutraliser, du moins de ralentir une telle évolution. C'est la raison pour laquelle ces projections relatives à l'évolution générale de la mortalité doivent être interprétées avec prudence. Elles ne reflètent peut-être qu'une situation transitoire, correspondant à la phase initiale d'un réchauffement, avant qu'un nouvel équilibre puisse être trouvé.

Parmi les pathologies les plus susceptibles de voir leur prévalence augmenter à l'occasion d'un réchauffement du climat (A. Mc Michael et A. Githeko, 2001), les plus gros risques concernent les maladies cardio-vasculaires. Mais le climat

peut aussi avoir des impacts variés sur l'appareil respiratoire avec, en particulier, une recrudescence printanière et/ou estivale des rhinites et des crises d'asthme, d'autant que la hausse des températures amènerait le déplacement de l'aire de répartition de nombreuses espèces végétales, dont certaines fortement allergisantes, tandis que la fréquence accrue du "beau temps" chaud, ensoleillé et exempt de fortes précipitations augmenterait les quantités de pollen libérées dans l'air. L'accroissement difficilement évitable de la pollution des

basses couches de l'atmosphère, avec des teneurs majorées en ozone et en autres polluants photochimiques, jouerait dans le même sens. On signalera encore, sans prétendre à l'exhaustivité, les présomptions qui pèsent sur une possible augmentation de la prévalence des lithiases ("calculs") urinaires, sur une élévation sensible du taux de prématurité avec un renforcement corrélatif du taux de mortalité périnatale, sur une recrudescence des admissions en urgence dans les services de psychiatrie, sur une multiplication des intoxications (du fait

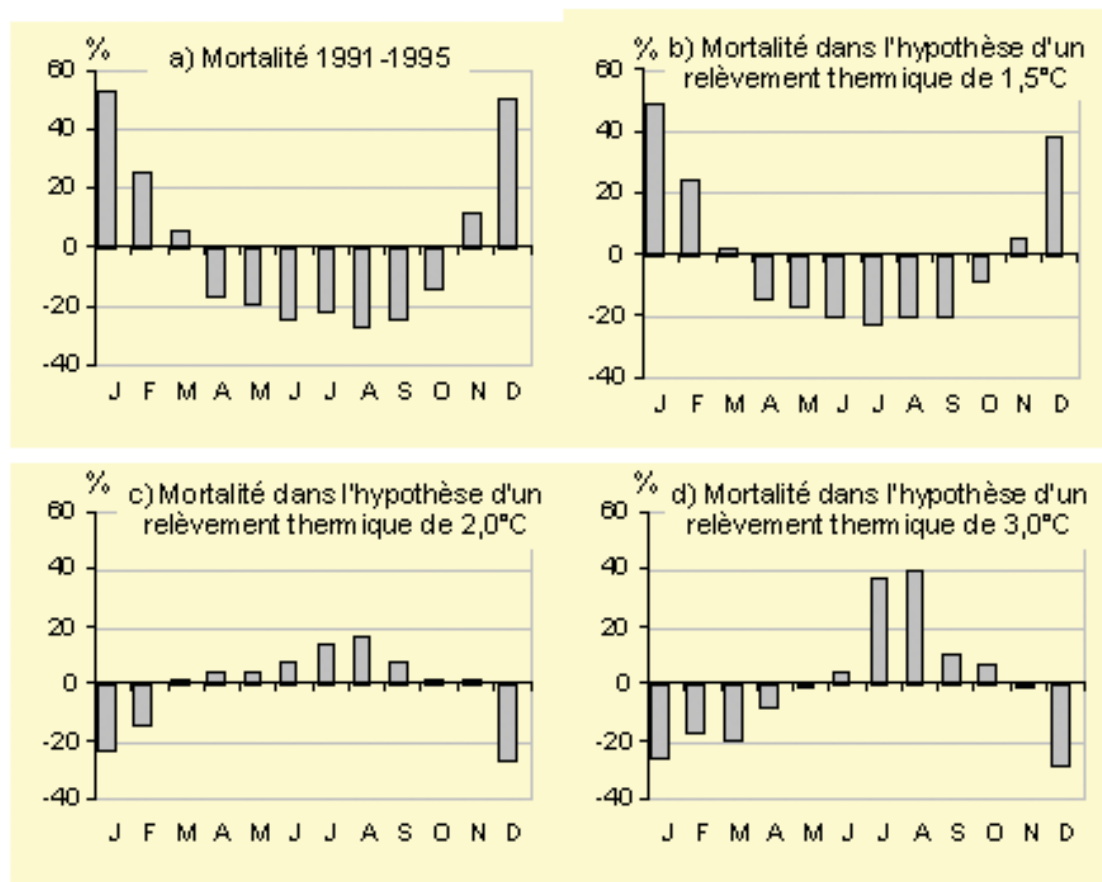


Figure 2 : Évolution attendue du rythme saisonnier de la mortalité en France en cas de réchauffement. Les pourcentages indiqués se rapportent à la moyenne annuelle 1991-95; ils doivent être interprétés comme de simples ordres de grandeur [en partie d'après <http://medias.obs-mip.fr/gicc/interface/projet.php?9/001>].

de la mauvaise conservation des aliments), ou encore sur un risque accru de contamination des systèmes de climatisation et/ou d'humidification par des micro-organismes variés, notamment la redoutable légionelle.

CONCLUSION

Une fois connus les liens actuels entre la chaleur et la mortalité, il pourrait paraître facile d'extrapoler à différents scénarios de réchauffement, dans le cadre du renforcement de l'effet de serre par l'action anthropique, et d'en déduire les conséquences les plus plausibles sur la santé. Cette entreprise comporte néanmoins une part importante d'incertitude, l'une des raisons en étant que l'on est alors obligé de raisonner toutes choses égales par ailleurs, alors que le contexte a toutes les chances d'évoluer, dans des directions que l'on peut éventuellement pressentir, mais avec une ampleur que l'on ne saurait quantifier.

Ce sont les possibilités d'adaptation qui constituent le biais le plus pernicieux. En effet, à la surface du territoire français, le niveau de l'optimum thermique (température où la mortalité est à son niveau le plus bas) s'élève aujourd'hui à mesure que l'on a affaire à un climat "normalement" plus chaud. Il s'ensuit que le nombre annuel de jours où la température moyenne s'inscrit au-dessus de l'optimum présente une assez forte homogénéité, aussi bien que dans le Nord que dans le Sud, dans l'Ouest que dans l'Est. Mais la question à laquelle nul ne saurait apporter de réponse argumentée reste de savoir si, en présence d'un réchauffement planétaire, un tel processus d'adaptation différentielle se poursuivrait – auquel cas les effets sanitaires du changement climatique auraient toutes chances de se trouver atténués, sinon annulés. Or, la

canicule de 2003 a bien montré que les régions habituées à la chaleur avaient moins souffert que celles où l'adaptation (non seulement physiologique, mais aussi technique, comportementale et sans doute culturelle...) était moindre.

Dans ces conditions, on est obligé d'admettre un certain nombre d'hypothèses simplificatrices et de raisonner comme si cette adaptation n'existait pas, ou comme si elle n'intervenait qu'avec retard. L'évolution envisagée ci-dessus ne reflète peut-être qu'une situation transitoire, correspondant à la phase initiale d'un réchauffement, avant qu'un nouvel équilibre puisse être trouvé.

En tout cas, ce qui est sûr, c'est que l'on peut "vivre avec" un réchauffement modéré, et ne pas trop en souffrir, alors qu'un réchauffement de plus forte ampleur aurait des répercussions beaucoup plus préoccupantes.

Le plus inquiétant pour l'avenir n'en reste pas moins la possible recrudescence des épisodes caniculaires, le vieillissement de la population et sa concentration de plus en plus forte dans de grandes agglomérations urbaines contribuant fortement à accentuer les risques. Les plus de 85 ans étaient 1,2 million en France en 2003 ; selon les estimations de l'INSEE, ils devraient être au moins 4,5 millions en 2050 – ce qui signifie qu'une vague de chaleur comparable à celle de 2003 pourrait, dès le milieu du XXI^{ème} siècle, occasionner non pas 15 000 décès, mais plus de 50 000 !

Dès lors, c'est avant tout sur la saison estivale que devrait être dirigé l'essentiel des mesures de prévention. Celles-ci peuvent prendre des formes multiples, de la généralisation de la climatisation (qui n'est sûrement pas une panacée, mais qui semble avoir fait la preuve de son efficacité aux États-Unis chez les personnes âgées, à domicile ou en institution)

jusqu'à des campagnes d'information sur les risques de l'hyperthermie et de la déshydratation. C'est à cette condition seulement que les effets hivernaux positifs du réchauffement climatiques pourront compenser ses effets estivaux dans l'ensemble délétères, à l'échelle de la France et de ses différentes régions, avec sans doute des points cruciaux dans le Midi méditerranéen et à Paris.

Mais répétons que ce serait une erreur de considérer les effets potentiels de l'évolution du climat hors de leur contexte: les variables météorologiques ne suffisent jamais à cerner les risques encourus et une même agression climatique n'est pas ressentie de la même façon dans différents milieux, économiques, sociaux ou culturels (J.P. Besancenot, 2006). On n'oubliera jamais qu'une dégradation de l'état de santé résulte toujours de la convergence d'un aléa extérieur (agression climatique) et d'une particulière vulnérabilité de la population exposée. La prudence reste donc le maître-mot. Mais prudence ne doit pas être synonyme de passivité et la mise en place d'un dispositif de surveillance épidémiologique paraît d'ores et déjà souhaitable.

RÉFÉRENCES

n Besancenot J.P. - Incidences possibles du réchauffement climatique sur la santé en France métropolitaine et dans les DOM-TOM au XXIème siècle. In : Impacts potentiels du changement climatique en France au XXIème siècle. Mission Interministérielle de l'Effet de Serre, 2ème éd., 2000, 111-121.

n Besancenot J.P. - Changement climatique et santé, la montée de l'inquiétude. Delachaux & Niestlé, 2006, à paraître.

n Martens P. - Health and climate change. Modelling the impacts of global warming and ozone depletion. Earthscan, 1998, 176 p.

n Mc Michael A., Githeko A. - Human health. In: McCarthy J.J., Canziani O.F., Leary N.A., Dokken D.J., White K.S., Climate change 2001: impacts, adaptation, and vulnerability. Cambridge University Press, 2001, 451-485.

n Rodhain F. - Impacts sur la santé : le cas des maladies à vecteurs. In : Impacts potentiels du changement climatique en France au XXIème siècle. Mission Interministérielle de l'Effet de Serre, 2ème éd., 2000, 111-121.

Pour en savoir plus :

n Haines A. - Les effets du réchauffement sur la santé. In : Le réchauffement de la terre. Éditions du Rocher, 1990, 186-201.

n Rodhain F. - Changements climatiques, maladies infectieuses et allergiques. Annales de l'Institut Pasteur, n° 16, 2003, 147 p.

n Rapport de l'AFFSA sur l'évaluation du risque d'apparition et de développement de maladies animales compte tenu d'un éventuel réchauffement climatique :

www.afssa.fr/ftp/afssa/basedoc/Rapport%20réchauffement%20climatique.pdf

Sites Web :

Changement climatique et santé de Santé Canada:

www.hc-sc.gc.ca/ewh-semt/climat/index_f.html

X-environnement :

www.x-environnement.org/Jaune_Rouge/JR00/besancenot.html

EID Méditerranée: www.eid-med.org/

GICC : <http://medias.obs-mip.fr/gicc/interface/projet.php?9/00>

2.8 Impact sur le tourisme

Jean Paul Céron - Centre de Recherche Interdisciplinaire en Droit de l'Environnement, de l'Aménagement et de l'Urbanisme
Ghislain Dubois - Tourisme, Transports, Territoires, Environnement Conseil

Jean Paul Céron est ingénieur de recherche au CRIDEAU. Il a participé à de nombreux rapports sur les impacts du changement climatique.

Il contribue en tant qu'auteur au prochain rapport du GIEC.

Ghislain Dubois est Directeur de TEC Conseil.

MESSAGES CLÉS

- Les scénarios climatiques actuels sont encore insuffisamment régionalisés pour permettre une évaluation fine des impacts sur le tourisme. On parle donc d'impacts « potentiels », ou « possibles », mais pas d'impacts « probables ».
- Le tourisme serait plus perturbé par des événements climatiques extrêmes que par une augmentation des températures s'étalant sur une longue période.
- Le confort thermique des touristes pourrait devenir problématique en été dans les régions méditerranéennes. Un « tourisme de fraîcheur » pourrait se développer et le printemps et l'automne deviendraient plus favorables au tourisme.
- L'impact le plus marquant pourrait être le manque de

neige, particulièrement en moyenne montagne, et le recul des plages (qui a cependant d'autres causes) et une concurrence accrue pour les ressources en eau nécessaires aux activités de loisirs. Les évolutions de la biodiversité et des paysages, auront une influence sur le tourisme plus difficile à évaluer.

- Au-delà de ces impacts directs et indirects, les politiques de limitation des émissions de GES dans les transports vont nous demander de repenser notre rapport au voyage, dans une perspective de remise en cause de l'hypermobilité. La croissance du transport aérien est le problème le plus difficile à prendre en charge.

INTRODUCTION

La canicule de 2003, comme les déficits périodiques d'enneigement en montagne, ont alimenté des inquiétudes légitimes sur la vulnérabilité au changement climatique d'une activité touristique très liée aux caractéristiques environnementales

locales. Si le mauvais temps peut ruiner une saison, un changement de climat peut ruiner une destination.

Au-delà de ces événements les plus marquants, il faut envisager l'ensemble des inter-relations entre le tourisme et le changement climatique :

- les effets du changement climatique sur les ressources climatiques et environnementales du tourisme, problème dont les acteurs du tourisme sont les plus prompts à se saisir, puisqu'il les menace directement ;
- la contribution du tourisme au changement climatique, en raison essentiellement de son fort recours aux transports, contribution généralement passée sous silence ou considérée comme une problématique « transports » plutôt que « tourisme », dont les premières études montrent pourtant qu'elle est considérable et augmente rapidement ;
- les effets possibles des politiques de lutte contre le changement climatique sur le tourisme, qui devraient finalement influencer plus rapidement sur le tourisme que sur des évolutions climatiques encore difficiles à évaluer avec précision.

CLIMAT ET ATTENTES DES TOURISTES

A la fin des années 80, J.P. Besancenot a produit une analyse détaillée des différents facteurs définissant les attentes des touristes (Besancenot 1989) et fourni des plages d'acceptabilité en particulier dans les domaines :

- de l'ensoleillement (durée, régularité)
- des précipitations diurnes, qui sont acceptables et même souhaitables dans certaines limites,
- du confort thermique qui résulte d'une combinaison de la température, de l'humidité de l'air et du vent.

L'examen des ces facteurs est non seulement pertinent au regard de l'agrément mais aussi de la santé : le soleil peut être source de cancers cutanés, les vents humides favorisent les accidents vasculaires cérébraux, l'association de vents violents et de froid accroît les risques d'infarctus, etc.

Certains auteurs se sont attachés à définir des indices de confort (Matzarakis, C.R. de Freitas et al. 2004) en combinant et pondérant ces divers facteurs, le confort maximum étant supposé atteint quand le corps au repos dépense une énergie minimum. Des statisticiens et économètres se penchent sur les changements de comportement des touristes en fonction des températures et en déduisent des situations considérées comme optimales.

Les chiffres qui résultent de ces travaux peuvent paraître parfois discutables ; ils ont toutefois l'intérêt de mettre en évidence l'existence de seuils qui pourraient être dépassés avec le changement climatique. Il faut néanmoins être très prudent quant aux conclusions à tirer de ces indications pour les comportements futurs des touristes.

En effet on a pu constater que les exigences climatiques des touristes varient à la fois selon les populations concernées et selon les époques. Les exigences climatiques des habitants du nord de l'Europe ne sont évidemment pas les mêmes que celles d'un Français ou d'un Espagnol . On sait également que la recherche du soleil est un comportement assez récent ; les populations méditerranéennes recherchent l'ombre et la fraîcheur. En un siècle les bienfaits recherchés dans un séjour à la mer ont totalement changé (du désir d'endurcir son corps au farniente...) et avec eux les exigences en matière de température de l'eau.

Le climat n'est qu'un des facteurs de choix pour des touristes qui peuvent être disposés à accepter certains excès : ainsi les destinations tropicales (dont la France d'Outre Mer) pourraient peu souffrir d'une hausse des températures parce que ceux qui s'y rendent s'attendent à avoir très chaud.

Les facteurs déclenchant les changements de comportement sont difficilement prévisibles, même si certains viennent facilement à l'esprit : par exemple une augmentation importante des cancers de la peau conjuguée avec un matraquage médiatique. D'autres mécanismes pourraient être plus inattendus : les européens du nord pourraient se désintéresser des résidences secondaires au sud de l'Europe s'ils constatent qu'il y fait trop chaud.

Les touristes recherchent la proximité de l'eau, utilisent souvent des habitats légers et se livrent à des activités plus exposées que celles de la vie quotidienne à des aléas naturels ou climatiques, dans des lieux où les possibilités de maîtrise des

événements sont parfois plus limitées. Ces facteurs confèrent au tourisme une vulnérabilité particulière par rapport aux tempêtes, aux orages violents, aux inondations, aux avalanches mais aussi par rapport aux feux de forêt et aux épisodes de sécheresse.

IMPACTS POTENTIELS

Le haut degré d'incertitude qui se dégage des lignes qui précèdent montre qu'il est nécessaire de parler d'impacts potentiels et non pas d'impacts prévisibles, les scénarios climatiques actuels ne procurant pas des résultats locaux assez fins notamment en matière d'événements extrêmes. C'est donc avec ce regard que l'on doit considérer les scénarios cli-



matiques futurs (voir article de S. Planton) et que l'on peut confronter les différences dans le changement climatique selon les saisons et les régions de l'hexagone avec les exigences mentionnées plus haut. On peut ainsi lister un ensemble d'impacts potentiels dont les plus marquants pourraient être les suivants :

- un premier effet, celui auquel on pense spontanément, serait pour la majeure partie du territoire à la fois un allongement de la saison propice au tourisme bien au delà de l'été et l'extension des conditions favorables vers le nord ;
- les potentialités des intersaisons actuelles seraient globalement accrues, avec de beaux automnes (secs) et des printemps doux mais pluvieux, succédant à des hivers très perturbés. Il est donc possible que le printemps profite de cette évolution tout autant que l'automne en raison de la sortie des conditions hivernales déprimantes ;
- Les perspectives sont différentes pour les régions méditerranéennes, déjà très chaudes l'été et qui pourraient souffrir d'un excès de chaleur et ainsi accueillir plutôt des populations jeunes et bien portantes, aptes à supporter des conditions caniculaires ;
- à l'inverse, l'été, les régions de montagnes (ou boisées si les incendies les épargnent) pourraient voir se développer un tourisme de fraîcheur ;
- l'hiver , il ne faut malheureusement pas s'attendre à une extension des conditions climatiques de la Côte d'Azur aux autres façades maritimes. Le golfe de Gênes bénéficie en effet d'une protection par rapport aux vents du nord qui ne se retrouve pas plus à l'ouest. A fortiori sur la façade atlantique, un défilé hivernal de perturbations avec un cycle de l'eau accéléré ne devrait guère, en dépit d'un climat plus

doux, favoriser un tourisme qui à cette époque concernera sans doute encore plus que maintenant une clientèle du troisième âge ;

- l'hiver devrait donc donner toutes leurs chances aux destinations où l'environnement est contrôlé : en France, les villes ou des « bulles tropicales », à l'étranger, des destinations exotiques si les voyages restent aussi accessibles qu'actuellement (ce dont on peut douter : voir plus loin)
- enfin le changement climatique devrait modifier les conditions de concurrence des destinations françaises par rapport aux pays voisins : il est clair que les destinations concurrentes du pourtour méditerranéen seraient plus durement touchées par les excès de chaleur que le midi de la France. Par contre, l'amélioration des conditions climatiques du nord de l'Europe pourrait conduire les clientèles d'Europe du nord à passer plus les vacances d'été chez elles qu'elles ne le font actuellement.

Au delà de ces considérations générales, certaines activités de tourisme et de loisirs apparaissent particulièrement sensibles vu les effets du changement climatique sur les ressources dont elles dépendent.

a) Activités de loisirs et ressources en eau

La baisse de la pluviométrie en été et la dégradation des ressources en eau devrait, si l'on s'en tient au scénario de Météo France, plus concerner le sud que le nord de l'hexagone. Ceci ne doit toutefois pas faire oublier que le pourtour méditerranéen de la France bénéficie de conditions d'approvisionnement privilégiées par rapport à de nombreuses autres destinations en raison de la proximité des Alpes.

En général les risques pour le tourisme concernant :

- l'approvisionnement en eau de certains équipements de loisirs (piscines, golfs...)
- une dégradation des environnements aquatiques à la fois physique (baisse de niveau des cours d'eau et des lacs) et qualitative (pollution...), avec des problèmes croissants d'arbitrage entre usages (tourisme vs agriculture...).

b) Sports d'hiver

Les impacts potentiels du changement climatique sur les ressources neigeuses et le tourisme de sports d'hivers font l'objet de nombreuses études (Scott, Jones et al. 2004). Cette focalisation tient sans doute au fait que l'on pense déjà pouvoir identifier des effets (comme pour le recul des glaciers par exemple) et que certaines destinations touristiques ont déjà vu leur activité de ski alpin disparaître ou rendue aléatoire (Ecosse...). La France a l'avantage de disposer d'un domaine skiable de haute altitude qui devrait beaucoup



mieux résister que les stations de basse et moyenne altitude, mais la base territoriale du ski alpin devrait en tout état de cause être à terme largement réduite. Les stratégies menées actuellement par les stations, qui tendent à la généralisation des équipements d'enneigement artificiel, posent des problèmes de rentabilité économique et d'impacts sur l'environnement (tension sur la ressource en eau, consommation d'énergie et... émissions de CO2).

c) Plages et tourisme balnéaire

Le recul du trait de côte constaté sur une grande partie du littoral résulte d'une conjonction de facteurs naturels et anthropiques qui ne peuvent qu'être aggravés par le changement climatique et l'élévation du niveau de la mer qui en découle. Entre prévention du phénomène, lutte frontale quand elle est indispensable, recul contrôlé et indemnisation des biens menacés, le débat est actuellement plus ouvert que par le passé, et la doctrine n'est pas stabilisée. Le Conservatoire du littoral ne s'oppose plus à l'érosion marine lorsqu'elle se manifeste sur ses terrains. Les ouvrages lourds y sont bannis, et le recul s'accompagne de tentatives de restauration des milieux dunaires. Dans les secteurs bâtis, il semble, devant l'inéluctabilité du phénomène dans certaines zones, qu'une logique d'indemnisation des terrains pris par la mer gagne du terrain. Dans une optique touristique, il importe d'abord de préserver les plages, première ressource touristique des destinations littorales.

d) Paysages et terroirs

On doit s'attendre à ce que les paysages changent ; ils l'ont déjà fait dans le siècle dernier en France, et de manière consi-

dérable. On peut d'ailleurs risquer l'hypothèse que les touristes supportent mieux les changements que les autochtones : à qui la disparition des cultures en terrasse de Provence a-t-elle fait le plus de peine ? On peut aussi rappeler que de nombreux « monuments naturels » (en particulier de rayonnement local) naguère pôles d'attraction touristique sont aujourd'hui complètement tombés dans l'oubli. Certaines ressources à la base d'un tourisme de terroir peuvent également disparaître ou voir leur qualité modifiée avec le changement climatique (on pense au vignoble). Il en va de même pour certains milieux supports de la biodiversité (les tourbières du Massif Central par exemple). Des études sur les parcs naturels d'Amérique soutiennent que le tourisme s'adapterait assez bien à de telles pertes (qui n'en seraient pas moins en elles-mêmes réelles).

IMPACTS INDIRECTS LIÉS AUX MESURES DE RÉDUCTION DES GAZ À EFFET DE SERRE

Le tourisme représente entre 8 et 10% des émissions de gaz à effet de serre de la France, principalement à travers les transports qu'il occasionne, qui peuvent représenter jusqu'à 95% des émissions totales d'un voyage pour une destination exotique lointaine, et près de 70% pour des vacances dans l'hexagone. Si la voiture domine en nombre de voyages et encore en nombre de kilomètres en France, en revanche en terme d'émissions de GES l'avion représente 60% des émissions françaises et 80% des émissions européennes. On voyage plus souvent, moins longtemps, plus loin et en favorisant des modes de transport plus polluants : l'intensité en transports du tourisme augmente et avec elle la sensibilité du tourisme à d'éventuelles politiques de transport plus restric-

tives.

La principale inquiétude pour le futur concerne le transport aérien qui connaît actuellement un rythme de croissance de l'ordre de 5% par an. Alors que les émissions des transports internationaux sont actuellement exclues du protocole de Kyoto, la prise en compte de ces émissions pourrait substantiellement accroître l'inventaire de gaz à effets de serre d'un pays donné. L'inclusion de la moitié des voyages aller-retour des touristes français et étrangers au départ ou arrivant en France par avion représenterait selon nos calculs de l'ordre de 33MT CO₂-e, à comparer aux 502 Mt d'émissions de la France entière en 2000 (dont 147 attribués aux transports).

Certaines ressources à la base d'un tourisme de terroir peuvent également disparaître ou voir leur qualité modifiée avec le changement climatique (on pense au vignoble)

La plupart des politiques de lutte contre l'effet de serre visant le transport sont également pertinentes pour le tourisme. Néanmoins il est important de considérer la nature des motivations spécifiques des touristes de même que les mécanismes décisionnels à l'œuvre : la nature du tourisme est hédoniste par excellence, et l'on ne peut pas traiter les touristes comme du fret. Ceci explique que les comportements de voyage des touristes peuvent se révéler particulièrement difficiles à influencer.

Le transport aérien constitue le point d'achoppement car une croissance en volume d'environ 5% l'an réduiront à peu

Si le tourisme doit continuer à se développer, il faudra que ce soit de manière sélective.

de choses les espoirs placés dans les améliorations techniques et opérationnelles qui sont de l'ordre de 1 à 2% par an au maximum.

Avec les efforts croissants demandés à l'industrie et au secteur résidentiel, et donc les possibilités d'amélioration plus limitées que par le passé, on peut s'attendre à ce que la pression pour une réduction des émissions de GES des transports, et notamment des émissions du transport aérien, soit plus insistante. Il paraît donc inévitable que l'on doive discuter de mesures affectant la demande, que ce soit par des mécanismes de taxation, de compensation, ou par des actions plus subtiles, par exemple sur l'organisation du temps de travail ou des calendriers scolaires.

Si le tourisme doit continuer à se développer, il faudra que ce soit de manière sélective.

Ceci est particulièrement évident si l'on prend au sérieux les objectifs des émissions de GES fixés pour 2050 par les pouvoirs publics. Quel avenir peut on imaginer pour le tourisme si la France doit diminuer ses émissions par un facteur 4 d'ici 2050 ?

On peut imaginer un futur du tourisme compatible avec des réductions des émissions de gaz à effet de serre ci-dessus, et dans le cadre de progrès technologiques forts mais qui ne relèvent pas de la science fiction (en particulier nos travaux retiennent les hypothèses de l'GIEC pour l'aviation), tout en assurant un meilleur accès aux vacances pour les couches

sociales défavorisées : tout le monde partirait nettement moins souvent, mais pour des séjours plus longs. Il paraît également possible d'assurer à une plus grande partie de la population l'accès à des destinations exotiques, mais pour un nombre très limité des voyages dans une vie, pour des séjours



de longue durée et avec des moyens de transports plus lents. Dans un tels scénario la minorité hypermobile doit cesser de voyager ad libitum (mais elle continue de voyager) et un renversement complet de l'imaginaire du voyage doit s'opérer. La majorité de la population doit changer de comportements, mais dans une large mesure une augmentation des loisirs de proximité peut compenser la baisse des voyages à longue et à très longue distance. Ce type de scénario « à bien être égal » ne se boucle qu'avec un très vigoureux transfert modal des modes de transport les plus polluants vers le train essentiellement (les européens vont en vacances en TGV...).

Cette conclusion qu'un tourisme est encore possible aurait pu ne pas paraître évidente au regard de la contribution du tourisme aux émissions de GES telle qu'elle a été développée

plus haut. Il est clair que si l'on veut atteindre une image de ce type en 2050, vu l'ampleur des changements nécessaires, il faut commencer à s'en préoccuper sans tarder. C'est pour cette raison que l'on peut penser que les politiques de modulation du changement climatique pourraient agir sur les tourisms bien avant que l'on ne constate un changement important du climat

RÉFÉRENCES

n Besancenot, J.-P. (1989). [Climat et tourisme](#). Paris, Masson.

n Matzarakis, A., C.R. de Freitas, et al., Eds. (2004). [Advances In Tourism Climatology](#). Freiburg

n Scott, D., B. Jones, et al. (2004). [Climate, Tourism and Recreation: a Bibliography](#). Waterloo, Canada, University of Waterloo.

Pour en savoir plus :

n Hall C.M. and Higham J. (Ed.), [Tourism, Recreation and Climate Change](#), Channel view publications, 2005 .Ouvrage de référence sur la question

n Peeters, P., T. van Egmond, et al. (2004). [European Tourism, Transport and Environment](#). Final Version. Breda, NHTV CSTT

n Rapport et déclaration de la première conférence internationale sur le tourisme et le changement climatique, organisée par l'Organisation mondiale du tourisme, à Djerba (Tunisie), en Avril 2003 :

www.world-tourism.org/sustainable/climate

Site du réseau Eclat : www.e-clat.org

Site de TEC Conseil : www.tec-conseil.com

2.9 Impact sur l'économie

Jean Charles Hourcade - Centre International de Recherche sur l'Environnement et le Développement

Jean-Charles Hourcade est Directeur de Recherche au CNRS et Directeur d'Etudes à l'Ecole des Hautes Etudes en Sciences Sociales. Il dirige le Centre International de Recherche sur l'Environnement et le Développement (CIRED). Il participe au Comité Scientifique du GICC (Gestion et Impacts du Changement Climatique), et est coordinateur les chapitres économiques au sein du GIEC (1997, 2001 et 2007).

Actuellement impliqué au sein du Conseil National pour le Développement Durable, il a été membre du Comité National de la Recherche Scientifique (1990-99).

MESSAGES CLÉS

- On parle de dommages et non plus d'impacts du réchauffement climatique quand on s'interroge sur ses effets sur le bien-être des populations.
- L'analyse précise des dommages ne peut se faire sans analyse des implications économiques des formes d'adaptation : variations de productivité du capital naturel, coûts liés à l'accélération de l'obsolescence du capital productif et des infrastructures, calcul des « aménités ¹ » environnementales, et coûts d'adaptation liés à l'occurrence d'événements à impacts graves de grande ampleur, tel que l'interruption de la circulation thermohaline.
- La difficulté centrale de l'évaluation économique est de passer des informations sur l'évolution des paramètres du

climat et des écosystèmes à l'échelle locale, à une description des coûts sociaux qui en résultent, et ceci dans une même métrique monétaire de façon à pouvoir comparer ce résultat au coût de la réduction des émissions de GES.

- Les évaluations de ce type qui existent sont extrêmement basses pour plusieurs raisons. D'une part, elles envisagent une économie stabilisée et réadaptée à un climat changé que l'on connaît par avance. D'autre part, elles ne prennent pas en compte les coûts d'adaptation à un climat changeant dont on ignore les caractéristiques. Enfin, elles ne tiennent pas compte des compensation entre les régions et des effets de propagation de chocs locaux.
- Le problème majeur vient du couple inertie-incertitude.

¹ Les termes « aménités environnementales » regroupent l'ensemble des satisfactions que l'on retire d'un climat donné et de sa permanence.

Le climat auquel il convient de s'adapter reste inconnu à l'échelle spatiale fine nécessaire pour apprécier les coûts d'adaptation et les dommages. L'incertitude est le facteur central (incertitude sur l'évolution locale des climats, incertitude sur la réaction des populations et des institutions) en raison de l'inertie de nos infrastructures économiques qui ne peuvent être rapidement transformées sans importants coûts économiques et sociaux.

- L'évaluation des dommages ne peut reposer sur la simple affectation d'une valeur plus ou moins précise à chaque type d'impact. Les dommages ultimes seront en effet déterminés par l'état des sociétés touchées, leur capacité à prévoir et à répondre à temps de façon cohérente.
- Le rythme du réchauffement est un paramètre aussi important que son niveau ultime, car l'important est d'évi-

INTRODUCTION

Pour parler des dommages que le changement climatique pourrait provoquer en France, je vais partir du point de vue des sceptiques. Il y a en effet deux attitudes possibles face à l'information rassemblée dans les chapitres précédents. La première est de considérer qu'un choc thermique de plusieurs degrés en un siècle ne peut pas ne pas entraîner d'énormes coûts écologiques et sociaux et que, vu l'inertie des systèmes techniques et de la machine climatique, il est sage de ne pas attendre une preuve définitive du niveau des risques pour réduire de façon conséquente nos émissions de GES. Ne pas le faire en pensant que le pire n'est jamais sûr ou que l'homme saura toujours résoudre les problèmes qu'il a créé serait se lancer dans une expérience d'ingénierie planétaire, un vrai pari faustien, celui qu'on ne reprend pas. En fait, si cette atti-

ter les points de rupture déclencheurs de rythmes de bouleversements trop élevés vis à vis de nos capacités de réaction. Aujourd'hui le réchauffement est dans une grande mesure « un coup parti » cependant, ralentir les émissions nous donne une chance de nous adapter à un coût modéré. La bonne question ne serait pas : « donnez-nous des chiffres des dommages pour voir si cela vaut le coup de faire de grands efforts d'abattement » mais « dites-nous, dans telle ou telle activité, où sont les ruptures possibles, et le prix des politiques de réduction des émissions qui nous permettraient de les éviter ? » Dans ce dernier cas on reviendrait à une application mieux informée du principe de précaution, en discutant du prix que nos sociétés seraient prêtes à payer pour éviter les évolutions qu'elles ressentiraient comme relevant d'une forme moderne de pari Faustien.

tude paraît sage, l'expérience montre que beaucoup demandent très vite des justifications plus précises dès qu'ils voient que contrôler les émissions pourrait passer par des mesures aussi désagréables que renchérir le prix de l'essence. Puisque tout euro dépensé dans la prévention du changement climatique ne le sera pas ailleurs, il faut alors justifier l'action par une évaluation de la réalité des dommages. Après tout, peut-on se dire, est-ce un coût ou un bénéfice si le climat de la Côte d'Azur se transporte à Deauville ?

LA NOTION DE DOMMAGE CLIMATIQUE

On commence à parler de dommage et non plus d'impact du réchauffement climatique quand on s'interroge sur ses effets sur le bien-être des populations. Cela force à rajouter un maillon de plus dans la chaîne qui va des émissions aux

concentrations puis au changement climatique et à la modification des écosystèmes, celui des réactions des économies et des sociétés. Il n'y a donc pas d'analyse précise des dommages sans analyse des implications économiques des formes d'adaptation (bonne ou mauvaise, subie ou pro-active), c'est à dire sans la prise en compte de plusieurs éléments de natures assez différentes et de leur interaction.

Les premiers coûts économiques à intégrer sont bien sûr ceux provoqués par les variations de productivité du capital naturel :

- variations de la productivité agricole et déplacement des essences forestières sous l'effet des transformations des températures, de la pluviométrie, des biotopes des parasites, de la montée des événements extrêmes (orages de grêle, tempêtes comme en Noël 2000); le défi sera, pour le secteur agricole de s'adapter à la transformation de la carte des cultures et des massifs forestiers
- augmentation des tensions sur les usages de l'eau entre agriculture, eau potable, usages « de confort » et production hydroélectrique, surtout d'ailleurs dans les régions aujourd'hui bien pourvues en pluies et qui n'ont pas le cumul d'expérience et d'infrastructures des régions méditerranéennes pour le stockage et l'utilisation parcimonieuse de l'eau,
- dans les zones côtières, conséquences de la salinisation des sols et de la fragilisation des deltas, lagunes et marais maritimes pour des élevages et cultures spécifiques et pour le tourisme,
- diminution des jours d'enneigement qui menace sérieusement les stations de moyenne altitude (baisse de 45% dans les Pyrénées au-dessus de 1500 m, de 25% dans les Alpes du Nord).



Dans une catégorie assez proche on peut classer les coûts d'une accélération de l'obsolescence du capital productif et des infrastructures. Au dossier médiatiquement sensible des événements météorologiques extrêmes (orages violents, inondations, périodes de sécheresses ou de pluviosité anormale engorgeant les sols dans le Nord) il faut rajouter les conséquences plus graduelles de l'accélération de l'érosion en zones côtières et en montagne.

Tout autre, plus difficilement chiffrable, est la catégorie des 'aménités' environnementales, c'est-à-dire des satisfactions que l'on retire d'un climat donné et de sa permanence. On songe bien sûr aux impacts sur la santé de chaleurs extrêmes dont l'importance a été révélée en 2004. On peut certes penser qu'on saura adapter nos habitats et systèmes d'alerte sanitaire, mais il est légitime de tenir aussi compte de la perte d'aménité provoquée par la modification de nos milieux de vie, par exemple le fait de vivre en permanence dans des

ambiances climatisées et confinées. Dans le même ordre d'idées, on ne peut ignorer la baisse de la valeur patrimoniale de certains paysages (glaciers de montagne, lagunes, forêts, sites urbains) et de la dévalorisation de son capital immobilier et foncier provoquée par la modification de l'attractivité de certaines zones. Hallegatte et al. (2005) montrent bien que, dans le cas de l'Ile de France, les ordres de grandeurs en jeu dans cette dévalorisation sont potentiellement très supérieurs aux coûts techniques déjà significatifs de l'adaptation de l'habitat (climatisation, modification de l'architecture et des structures urbaines pour minimiser les effets négatifs de l'îlot de chaleur urbain).

Il reste enfin le risque majeur des 'surprises climatiques' comme l'interruption de la circulation thermohaline qui nous priverait du courant de chaleur du Gulf Stream et provoquerait dans nos régions une baisse brutale des températures, de l'ordre de 5° à 10°C. Nous rentrons là dans le domaine du risque absolu dont on ne sait pas aujourd'hui évaluer le degré de plausibilité et dont on ne voit pas comment chiffrer les conséquences. On l'ignorera dans la section suivante mais, on y reviendra en conclusion, il ne fait que montrer, par un passage à la limite, la nécessité de ne pas se tromper sur la nature même de la question à poser quand on traite des dommages.

ÉVALUATION DES DOMMAGES

La difficulté centrale de l'évaluation économique est de passer des informations sur l'évolution des paramètres du climat et des écosystèmes à une échelle locale, à une description des coûts sociaux qui en résulteraient, et ceci dans une même métrique monétaire de façon à pouvoir comparer le résultat

obtenu au coût de la réduction des émissions. Aucune évaluation de ce type n'existe pour la France mais d'autres sont disponibles pour le monde, qui permettent de pointer, malgré leur caractère sommaire, les difficultés de ce type d'exercice et, au-delà, les pièges à éviter dans le débat public. Ces évaluations mondiales sont en effet extrêmement basses et permettent de comprendre l'origine des coûts du changement climatique en examinant les raisons pour lesquelles elles arrivent à des conclusions si optimistes:

- les transitions se passent bien ; ces études envisagent en effet une économie stabilisée et réadaptée à un climat changé que l'on connaît par avance, pas sur les coûts d'adaptation

(...) vu l'inertie des systèmes techniques et de la machine climatique, il est sage de ne pas attendre une preuve définitive du niveau des risques pour réduire de façon conséquente nos émissions de GES.

à un climat changeant dont on ignore ex-ante les caractéristiques,

- il y a compensation entre les régions : ainsi Mendelsohn et al. (1997) évaluent les dommages climatiques à 0,3% du PIB mondial, mais ce chiffre agrège des dommages très inégalement répartis avec des pertes de 4,7% pour l'Afrique. S'en tenir à des chiffres agrégés c'est alors admettre que les régions gagnantes ou faiblement impactées compenseront les régions fortement touchées,
- on ne tient pas compte des effets de propagation de chocs

locaux : la forte perte du PIB en Afrique est provoquée par une forte baisse de la production agricole et celle-ci renvoie à un risque d'explosion de besoins alimentaires non satisfaits. Si des aides suffisantes ne lui sont pas données, on aura alors un choc économique majeur, des tensions régionales et des mouvements d'exode des populations.

Pour prendre un exemple en France, on peut considérer que le réchauffement climatique se traduira à long terme par un transfert à Deauville de la densité d'activité touristique d'une Côte d'Azur devenue trop chaude et trop sèche, donc par une perte globale voisine de zéro. Mais une analyse économique complète devrait vérifier s'il n'y a pas de coûts économiques et sociaux potentiellement importants dus aux frictions inévitables d'un tel transfert et au fait qu'une forte baisse des revenus touristiques en côté d'Azur risque de se propager dans tout l'équilibre économique de la région et par une forte dévalorisation de son capital accumulé si des activités de remplacement ne viennent pas à temps combler le vide. A cela se rajoute bien sûr le fait qu'il n'est pas évident que les habitants de la Côte d'Azur ne soient pas affectés par une forte dégradation de leur cadre de vie ou par la perspective de déménager vers des lieux restés ou devenus plus cléments. En d'autres termes, il y aura dans deux siècles des populations adaptées à (et heureuses de) leur nouvel environnement mais entre temps, il y aura bien des coûts économiques et sociaux à prendre en compte.

Une part importante de ces coûts de « transition » est due aux nécessités d'adaptation des infrastructures : approvisionnement en eau, adaptation des bâtiments, climatisation, ajustement des systèmes électriques à l'apparition d'une 'pointe d'été' et à la baisse de la réserve de puissance que représen-

tent les barrages hydroélectriques, renforcement de la résistance aux événements extrêmes. En fait, le problème majeur ici vient du couple inertie – incertitude.

Le climat auquel il convient de s'adapter reste en effet largement inconnu à l'échelle spatiale fine qui est nécessaire pour apprécier les coûts d'adaptation et les dommages. Hallegatte et al (2005) montrent par exemple que, selon que l'on suit les simulations de Météo France ou celles du Hardley Center, les meilleurs analogues pour le climat de Paris en 2100 sont respectivement Bordeaux et Cordoue, ce qui constitue des environnements pour le moins différents. Or la variabilité du climat introduit un effet de brouillage du signal que les modèles ne pourront dissiper avant longtemps, surtout si on tient compte des délais inévitables dans l'acceptation sociale d'un diagnostic déplaisant que l'observation des faits alentour ne corrobore pas, l'effet Cassandre si couramment répandu. De plus, même s'ils sont convaincus d'agir, les agents économiques, au moment de planifier des mesures d'adaptation (canons à neige en montagne, protections face aux inondations, sélection des espèces de semences), peuvent être influencés par la conjoncture des anomalies météorologiques et les interpréter faussement comme représentatives de la tendance future.

Ce jeu de l'incertitude est suffisant pour relativiser les hypothèses optimistes de ceux qui pensent que les mesures d'adaptation sont relativement rapides à mettre en place au fur et à mesure du changement observé (climatisation, dates des semis, irrigation, changement des cultures). Schneider et al. (2001) soulignent qu'il y a un délai d'une vingtaine d'années entre les premiers signes d'un changement climatique et la détection de ses conséquences par l'exploitant agricole ; on



est loin de l'hypothèse de clairvoyance parfaite. La difficulté est bien sûr encore plus grande pour la construction d'ouvrages de défense le long du littoral, la planification de l'occupation des sols, la transformation de la conception des bâti-

ments et de la planification urbaine. Or, on ne saurait jamais oublier qu'il est rare, vu le niveau des controverses et des intérêts acquis qu'il faut bousculer, que les décisions soient prises à temps et à travers un calcul rationnel serein. Les difficultés d'anticipation collective des sociétés font partie du problème et constituent potentiellement un important accélérateur de coût. Ces difficultés ne vont d'ailleurs pas systématiquement dans le sens d'un sous-investissement en adaptation ; la puissance et la rapidité accrues de la circulation des images par les médias accélèrent de nos jours la propagation des phénomènes de confiance et de défiance et il se peut que la couche additionnelle de chocs émotifs apportée par les désordres climatiques soit suffisamment significative pour affecter la confiance des populations dans des régions durement touchées et pour induire une grande peur et des pressions politiques qui conduisent à surinvestir dans la protection avec souvent alors des décisions prises en urgence pour calmer la peur et qui conduiraient ici à des coûts excessifs, voire à une maladaptation.

On peut certes nuancer ce qui précède en pensant que les mécanismes d'assurance permettront de lisser les à coup. Mais c'est de ce secteur que montent aujourd'hui des alertes qui amènent à ne pas se rassurer à trop bon compte. Le coût incrémental du changement climatique pour le secteur de l'assurance en France est estimé (FFSA 2000) entre 1,5 et 7,5 milliards d'euros pour les seuls dommages aux biens des tempêtes, autour de 6 milliards d'euros pour les inondations. En fait, un des enjeux est qu'il est d'un côté probable que l'assiette des risques couverts soit appelée à se réduire et de l'autre que les montants des coûts de ré-assurance augmentent pour garantir la viabilité du système. Au total l'assuran-

ce est un 'lisseur' d'incertitude mais aussi un multiplicateur de coûts, en particulier par la mise en cause d'activités qui, en raison du changement climatique apparaîtront inassurables.

Au total, l'évaluation des dommages ne peut reposer sur la simple affectation d'une valeur plus ou moins précise à chaque type d'impact. Les dommages ultimes seront en effet déterminés par l'état des sociétés touchées, leur capacité de 'prévoir' et répondre à temps de façon cohérente. Les travaux archéologiques (Weiss et al., 2001) qui ont établi des coïncidences entre transition brutale du climat et mutation en profondeur des sociétés (changement de mode de subsistance, abandon des terres, désorganisation socio-politique) devraient nous alerter ; nos sociétés modernes ont de bien plus grandes capacités d'adaptation mais elles ont aussi de plus grandes capacité d'impact sur leur environnement naturel. Le récent exemple du cyclone Katrina, dont les coûts ont été multipliés par la rupture de digues mal entretenues suite à une baisse des investissements d'entretien montre bien que les risques de mauvaise anticipation des signaux, de mauvaise gestion ou de désorganisation d'une chaîne de commandement doivent être incorporés dans l'évaluation des dommages au moment où on les met en balance avec les coûts de la prévention du changement climatique c'est-à-dire de baisse des émissions de GES.

Nous terminerons ici par une considération qui pourra paraître plus abstraite, plus macroéconomique mais qui n'en est pas moins décisive à savoir qu'on ne saurait s'en tenir à une simple approche énumérative des dommages et ignorer les effets de propagation et l'impact des investissements d'adaptation sur la croissance. Sur le premier point, une disparition



de microclimats déclanchant la fin de la pourriture noble qui 'fait' le Sauternes ou la montée en sucre des vignobles du champagne ou encore la perte de productivité des essaims d'huîtres à Arcachon mettent en jeu plus que le chiffre d'affaire de ces produits. Si l'évolution est lente on peut penser que des adaptations pourront se faire sans trop de drames ; si elle est trop rapide, c'est la base même de structures économiques locales établies de longue date qui sera fragilisée. Le deuxième effet macroéconomique passe par les effets dynamiques sur la croissance des investissements d'adaptation et de l'obsolescence accélérée des équipements. Notre économie investit bon an mal an autour de 20% de son revenu et, sur ces 20% une partie essentielle va aux bâtiments individuels (un bon tiers) puis aux bâtiments publics, aux transports et à l'énergie. Une part finalement très minoritaire (5 à 7%) va aux investissements dans l'industrie manufacturière et les services où se situent la majorité des activités insérées dans la compétition internationale. Dès lors, deux pourcent du PIB consacrés à des investissements d'adapta-

tion représentent en fait dix pourcents de nos investissements et peuvent selon la façon dont ils sont gérés affecter de façon très significative nos capacités d'investissement industriel. Au total, l'effet dynamique sur la croissance sera nettement supérieur à la somme des dépenses.

LE CHANGEMENT CLIMATIQUE HORS DE L'HEXAGONE

On ne saurait dresser un tableau des risques que représente le changement climatique pour la France sans mentionner, fût-ce brièvement, le fait que ces risques ne viennent pas des seuls impacts de ce changement sur les écosystèmes de l'hexagone.

La configuration qui revient fréquemment dans la littérature est celle des conflits locaux et phénomènes migratoires (climate change refugees) attisés par des ruptures locales accélérées par le changement climatique (Parry, 1999). La rareté croissante de l'eau et la désertification sont un déclencheur évident de ce type de mécanisme ; par exemple, le rapport Deneux (2001) montre que les disponibilités en eau risquent de descendre en dessous du seuil de pénurie (500 m³/hab/an) dès 2025 dans cinq Etats du Sud et de l'Est de la Méditerranée en 2025 et dans huit en 2050. Or ceci se produirait dans un contexte où les tensions pour l'accès à l'eau sont déjà fortes entre Etats et où l'explosion démographique conduit à des conflits croissants pour l'usage de l'eau entre centres urbains et activités agricoles. Dans le monde, les autres points de fragilité sont l'Asie du Sud-Est (zones de mousson avec le problème spécifique de la montée des eaux pour le Bangladesh, les îles du Pacifique et l'Amérique Centrale. La pression migratoire en sera aggravée et notre pays ne

pourra éviter d'y être confronté.

Certes on peut songer à cette forme de prévention que constitue l'aide. Mais, pour donner une idée des ordres de grandeur en jeu on reviendra aux chiffres, déjà cités, de Mendelsohn et dont nous avons vu qu'ils ne donnaient qu'un tableau très partiel des changements. Or, pour lui, les flux financiers Nord-Sud nécessaires à une compensation adéquate représenteraient un doublement de l'aide publique au développement (OCDE, 2001). Déjà peu envisageable en l'état au vu de la pratique des pays occidentaux depuis des décennies et au moment même où les populations de ces pays se sentent menacées par la compétitivité des pays émergents, une telle augmentation des transferts deviendrait vite irréaliste en cas de dommages supérieurs à cette évaluation fort optimiste.

CONCLUSION

Les dommages provoqués en France par le changement climatique ne viendront donc pas mécaniquement des impacts de ce changement sur notre hexagone. Ils viendront de la difficulté qu'il y a à anticiper pour s'adapter à temps aux évolutions, difficultés qui viennent tout autant de la fragilité des prédictions des modèles climatiques à l'échelle régionale au-delà d'un certain seuil de détails et de précision spatiale, que de notre réticence collective à écouter les Cassandre ou encore de nos sur-réactions après que nous ayons observé les conséquences de notre myopie. Dès lors c'est l'incertitude qui devient le facteur central puisque nos infrastructures économiques ont une inertie telle qu'elles ne peuvent être rapidement transformées sans importants coûts économiques et sociaux, incertitude sur l'évolution locale des climats, incertitude sur la réaction des populations et des institutions.

Ce sont ces éléments que devrait prendre en compte toute étude des dommages visant à un chiffrage économique qu'on mettrait en balance avec le coût des politiques de baisse des émissions, car tel est finalement l'enjeu. Procéder autrement rendrait un mauvais service au débat public, mais en même temps, on se rend compte à quel point une telle évaluation est difficile vu la cascade d'incertitude qu'elle met en jeu. Or la 'demande sociale' telle qu'elle est formulée dans les commandes par les ministères, les autorités locales, les entreprises ou les unions professionnelles va spontanément pousser à donner « le chiffre le plus probable ». Il faut donc progresser dans l'évaluation économique des dommages, mais en prenant bien soin de représenter les fourchettes d'incertitude et de mobiliser les quelques outils qu'ont les économistes pour traiter des décisions dans l'incertain (aversion au risque, valeur d'option qui signifie qu'il y a une vraie valeur sociale à protéger notre capacité d'agir dans le futur et de ne pas se piéger dans des situations trop risquées).

Ce faisant, on risque d'ailleurs de revenir vers un schéma de pensée très proche de la première des attitudes face aux risques globaux que nous avons décrite en introduction. L'important en effet est d'éviter les points de rupture, ces situations où le rythme des bouleversements induits par le changement climatique est trop élevé vis à vis de nos capacités de réaction, telles qu'elles résultent de nos capacités techniques, économiques et institutionnelles. Le rythme du réchauffement est donc de ce point de vue un paramètre aussi important en définitive, que le niveau ultime du réchauffement. On sait aujourd'hui que le réchauffement est dans une grande mesure 'un coup parti' ; mais ralentir les émissions, c'est en fait à nous donner une chance de pouvoir s'adapter

à un coût modéré. La bonne question pourrait donc être non pas « donnez-nous des chiffres des dommages pour voir si cela vaut le coup de faire de grands efforts d'abatement » mais « dites-nous, dans telle ou telle activité, où sont les ruptures possibles, et le prix des politiques de réduction des émissions qui nous permettraient de les éviter » Dans ce dernier cas on reviendrait à une application mieux informée du principe de précaution, en discutant du prix que nos sociétés seraient prêtes à payer pour éviter les évolutions qu'elles ressentiraient comme relevant d'une forme moderne de pari Faustien.

RÉFÉRENCES

n 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 d'information 224 (tomes I&II), Office parlementaire d'évaluation des choix scientifiques et technologiques, Sénat, PARIS.

n GIEC/TAR/WGII, « Climate change 2001: Impacts, adaptation and vulnerability », Contribution of Working Group II to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, McCarthy, J. J., Canziani, O. F., Leary, N. A., Dokken, D. J. & White, K. S. (eds), Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, 2001.

n GIEC/TAR/SR, "Climate Change 2001: Synthesis Report", Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, 2001.

n Hallegatte S., Hourcade J.-C., Ambrosi, 2005, Using Climate Analogues for Assessing Climate Change Economic Impacts in Urban Areas, en cours de revue pour Climatic Change.

n Martin, E. (2000). "Modification de la couche neigeuse" in MATE, MIES (2000), « Impacts potentiels du changement climatique en France au XXIème siècle » (2nde édition). M. Mousel (MIES) et B. Lesaffre (MATE) (éd.).

n Munich Re (1999), "Annual review of natural catastrophes 1998". Topics, Munich.

n Munich Re (2000), "World of Natural Hazards" (cédérom). Munich.

n The National Academies (2002). "Abrupt climate change: inevitable surprises". Committee on abrupt climate change, Ocean Studies Board, Polar Research Board, Board on atmospheric sciences and climate, Division on earth and life studies, the National Academies, National Academy Press, Washington DC, USA, 2002.

n World Bank (2000). Cities, Sea and Storms: Managing change in Pacific Island Economies. World Bank, Washington D.C., USA.

Pour en savoir plus :
CIRED : www.centre-cired.fr

Analogues climatiques pour le climat futur des villes européennes

Stéphane Hallegatte - Center for Environmental Sciences and Policy (Stanford Institute for International Studies) et Ecole Nationale des Ponts-et-Chaussées.

Les stratégies d'adaptation, qui se construisent sur le court et moyen terme dans un contexte très incertain, peuvent être responsables de verrouillages sur le long terme, qui influencent la croissance et le bien-être. Pour illustrer cet effet, on a utilisé la méthode des analogues climatiques, qui permet à la fois de nourrir la réflexion sur l'adaptation mais aussi de donner un sens accessible aux prédictions des modèles climatiques. En effet, il est difficile, en particulier pour les non-spécialistes, de se représenter ce que signifie un réchauffement de quelques degrés de la température moyenne. Par exemple, que représente une augmentation de 4°C en 100 ans de la température moyenne à Paris ? Est-ce grave ? Pour répondre à cette question, on recherche une ville qui a aujourd'hui un climat comparable au climat futur que le modèle prédit pour Paris à la fin du siècle. Pour cet exemple, on trouve ainsi que le climat de Paris en 2100 ressemble fortement au climat actuel de Cordoue, dans le sud de l'Espagne. En comparant ces deux villes, on imagine facilement ce que représente le changement climatique en terme de modification des conditions de vie, en terme d'adaptation de l'urbanisme, de l'architecture des habitations, de système énergétique, de gestion des eaux...

On peut ensuite généraliser cette approche à plusieurs

villes et à plusieurs modèles pour obtenir la **Figure 1**, issue d'un travail de recherche dans le cadre du projet PRUDENCE, qui représente un certain nombre de villes européennes à l'endroit qui a aujourd'hui un climat proche de celui qu'elles auront à la fin du siècle. On constate aisément que le changement climatique constitue une modification radicale des conditions de vie. La comparaison des résultats pour deux modèles permet en outre de se donner une idée de l'incertitude qui pèse sur ces prédictions. Ces cartes permettent donc au non-spécialiste de se faire idée de l'ampleur du changement qui nous attend et de l'incertitude qui subsiste sur ses conséquences.

Intuitivement, certains pourraient se réjouir de vivre dans le futur sous un climat plus chaud et plus sec. Pourtant, il faut garder à l'esprit qu'un été qui aurait été « normal » à Cordoue a provoqué plus de 15.000 décès en France en 2003 : le besoin d'adaptation aux nouvelles conditions climatiques sera probablement immense. Or, les bâtiments, les infrastructures et les systèmes électriques ont des durées de vie importantes et représentent une part importante du capital installé. Eviter une mauvaise adaptation de ces secteurs aux conditions climatiques, et donc une mauvaise allocation du capital, demande donc une anticipation des investissements qui reste hors de portée à cause de l'incertitude sur le réchauffement futur. Nous

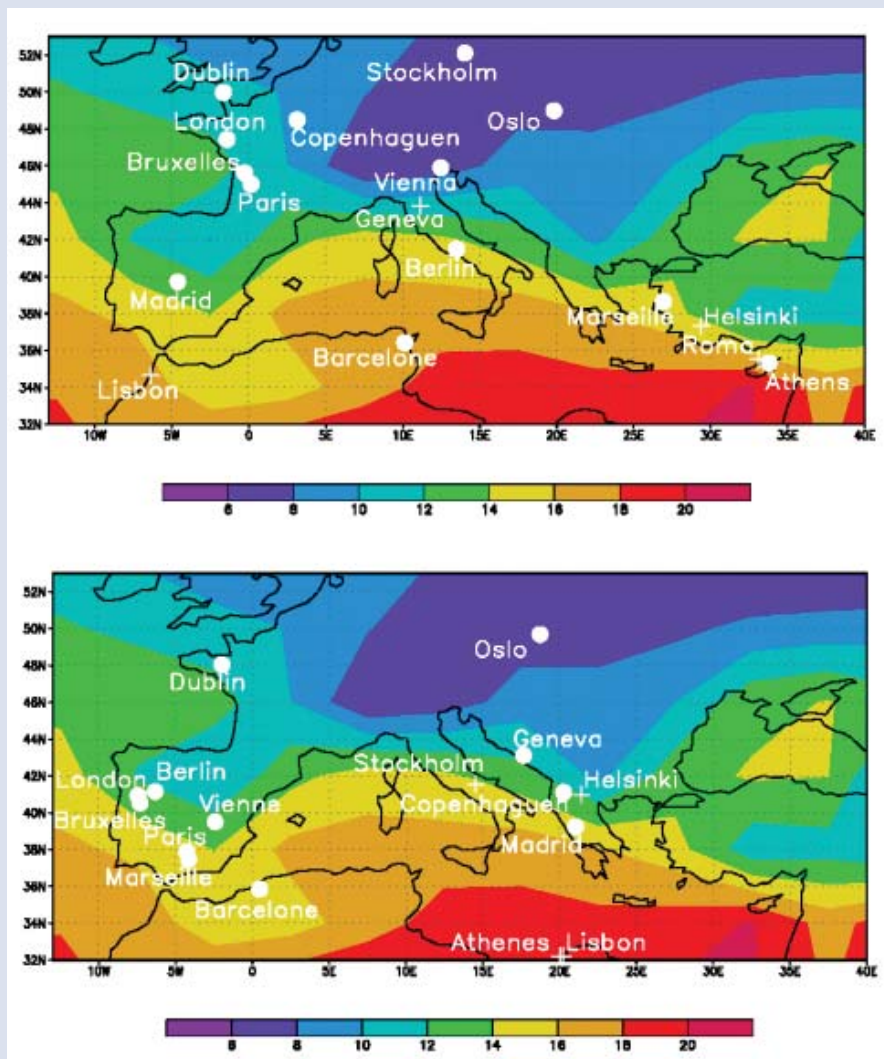


Figure 1 : Carte de l'Europe et du bassin Méditerranéen. Les villes sont représentées par des cercles à la position de leur analogue climatique, i.e. à l'endroit qui a aujourd'hui un climat proche de celui qu'elles auront à la fin du siècle, d'après les modèles climatiques. Quand aucun analogue acceptable n'a été trouvé, une croix représente la position du meilleur analogue en termes de température seulement, en négligeant les précipitations. La carte du haut est pour le modèle ARPEGE-Climat, celle du bas pour le modèle du Hadley Centre.

en concluons que les dommages du changement climatique sont autant liés à l'incertitude sur le réchauffement qu'au réchauffement en lui-même et que, à l'instar de nos décisions de réductions d'émissions, les décisions concernant l'adaptation dans les prochaines décennies vont nous engager sur le long terme.

RÉFÉRENCES

n Hallegatte S., Hourcade J.-C., Ambrosi P., 2005, *Using climate analogues for assessing climate change economic impacts in urban areas*, en révision pour *Climatic Change*

Pour en savoir plus :

PRUDENCE:

<http://www.cru.uea.ac.uk/projects/mps/html/prudence.html>

Liste des institutions

Centre de Recherche Interdisciplinaire en Droit de l'Environnement, de l'Aménagement et de l'Urbanisme (CRIDEAU)

Le CRIDEAU est une équipe de recherche de l'Université de Limoges associée au CNRS et à l'INRA. Ses recherches en droit de l'environnement et du développement durable s'inscrivent dans les 3 grands axes : principes et démocratie, urbanisme durable, nature et biodiversité.

Centre International de Recherche sur l'Environnement et le Développement (CIRED)

Le CIRED a été fondé en 1973 autour des enjeux de l'harmonisation entre environnement, gestion des ressources naturelles et développement économique, problématique aujourd'hui popularisée sous le vocable développement durable. Après avoir, en quelques trois décennies été présent aussi bien dans les pays industrialisés que dans les pays en développement sur des dossiers aussi divers que l'énergie, la gestion des déchets, les transports, l'eau, l'alimentation, le CIRED s'est investi à la fin des années 80 sur les enjeux d'environnement global (ozone, pluies acides, changement climatique) et les questions liées à l'application du principe de précaution.

Commonwealth Scientific and Industrial Research Organisation (CSIRO)

Le CSIRO est une organisme de recherche scientifique et industriel qui emploie dans le domaine agricole, l'énergie,

l'environnement et ressources naturelles, la santé, les technologies de l'information, l'industrie, les ressources minérales.

Institut de Recherche pour le Développement (IRD)

L'IRD est un Etablissement Public Scientifique et Technologique chargé de conduire et de promouvoir des recherches en partenariat avec les pays du Sud. Il est placé sous la double tutelle du Ministère de la Recherche et de l'Enseignement Supérieur et du Ministère des Affaires Etrangères.

Institut Languedocien de recherche sur l'Eau et l'Environnement (ILEE)

L'ILEE est un institut fédératif de recherche labellisé par le Ministère de la Recherche et de l'Enseignement Supérieur. Il regroupe à Montpellier et à Alès neuf unités de recherche, travaillant dans le domaine des sciences de l'eau et relevant de plusieurs établissements publics.

Institut National de la Recherche Agronomique (INRA)

L'INRA a vocation d'effectuer des recherches dans les domaines de l'agronomie, de l'alimentation et de l'environnement.

Institut Pierre Simon Laplace (IPSL)

L'IPSL est une structure fédérative de quelques 750 personnes répartis dans six laboratoires. Ces laboratoires et la

structure fédérative, placés sous la tutelles de quatre organismes gouvernementaux (CNRS, CEA, IRD, CNES) et de quatre établissements d'enseignement supérieur (Université Pierre et Marie Curie, Université de Versailles Saint-Quentin, Ecole Normale Supérieure, Ecole Polytechnique), sont implantés sur plusieurs sites en région parisienne. L'IPSL étudie l'évolution du climat, de l'effet de serre et de la couche d'ozone, et s'intéresse à la pollution de l'air et des océans. Dans une perspective plus large, il cherche aussi à comprendre les processus qui régissent l'évolution des autres environnements planétaires du système solaire.

Laboratoire d'Economie de la Production et de l'Intégration Internationale (LEPII)

Le LEPII est une formation de recherche du CNRS et de l'Université Pierre Mendès-France, Grenoble

Laboratoire de Glaciologie et Géophysique de l'Environnement (LGGE)

Le LGGE est une Unité Mixte de Recherche sous la double tutelle du Centre National de la Recherche Scientifique et de l'Université Joseph Fourier (Grenoble I). Le LGGE a bâti sa renommée scientifique sur l'étude du climat et de la composition de l'atmosphère. Ces études portent sur le présent mais aussi sur les évolutions passées au travers des archives que constituent la neige et la glace accumulées au cours du temps. Le LGGE possède d'autres savoirs-faire très compétitifs centrés sur la neige et la glace, comme l'étude physique et mécanique du matériau glace, les échanges chimiques air-neige ou encore l'acquisition de données sur le terrain et par satellite.

Météo France

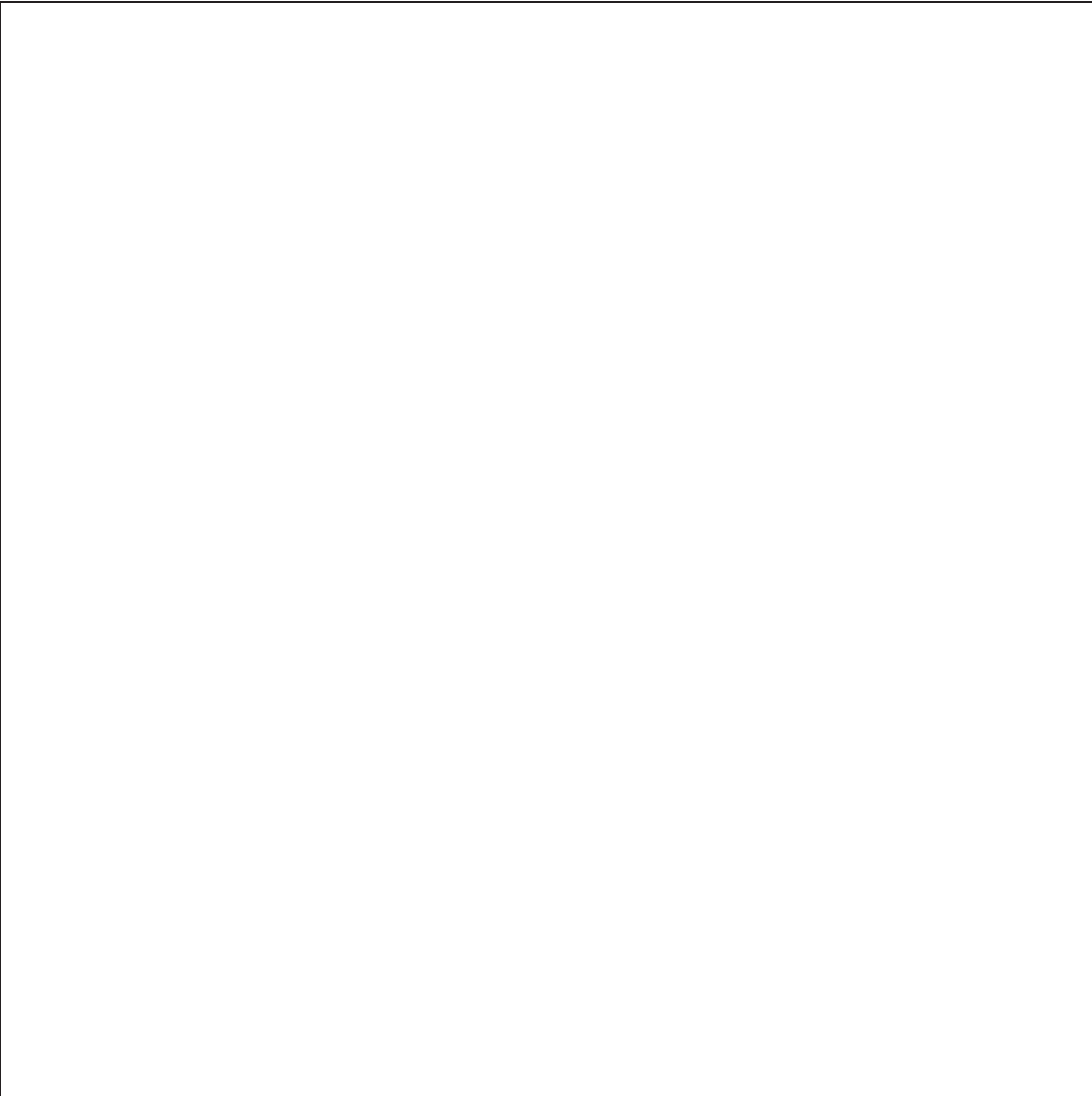
Météo-France est le service météorologique français qui a pour mission de surveiller l'atmosphère, l'océan superficiel et le manteau neigeux, d'en prévoir les évolutions et de diffuser les informations correspondantes. La Direction de la Climatologie a pour missions : la collecte, le contrôle et l'archivage des données climatiques, la diffusion de l'information climatologique, les applications de l'information climatologique, la recherche sur les processus climatiques, le système climatique, les méthodes en climatologie, le suivi climatique. Le Centre Nationale de Recherches Météorologiques (CNRM) est un Laboratoire mixte Météo France - CNRS qui mène des recherches dans les domaines de la prévision du temps, la physique de l'atmosphère, la connaissance du climat, de sa variabilité et de son évolution.

National Center for Atmospheric Research (NCAR)

NCAR est un centre national de recherche pour les sciences atmosphériques, fondé par la National Science Foundation des Etats-Unis. Avec des partenaires dans les universités et centres de recherche, le centre est consacré à l'exploration et la compréhension de l'atmosphère et de ses interactions avec le soleil, les océans, la biosphère, et la société humaine.

Tourisme, Transports, Territoires, Environnement Conseil (TEC)

TEC est un cabinet de conseil spécialisé dans les secteurs du tourisme et des transports





Climpact est une société de conseil spécialisée dans la gestion du risque climatique. Sur la base de compétences scientifiques, Climpact développe les outils de quantification des impacts liés aux aléas climatiques, passés et futurs.

Climpact et Météo France se sont associées pour la diffusion de ces outils auprès des industriels des Produits de Grande Consommation.

Climpact intervient également auprès des entreprises et institutions pour des expertises liées aux conséquences du changement climatique.

Essaimage de l'Institut Pierre Simon Laplace, Climpact est double lauréat du concours National de la Création d'Entreprise de Technologies Innovantes du Ministère de la Recherche.



Présente dans 40 pays, Greenpeace est une organisation non-gouvernementale écologiste et pacifiste. Son indépendance est assurée par ses 3 millions d'adhérents à travers le monde (dont près de 100.000 en France).

Depuis plus de 30 ans, Greenpeace mène des campagnes sur les problèmes environnementaux les plus critiques à l'échelle planétaire; la lutte contre les changements climatiques est en tête de ses priorités au niveau national et international.

**Tout savoir sur ce rapport et plus encore :
www.impactsclimatiquesenfrance.fr**