



**HAL**  
open science

## Évolution des climats

Jean Dercourt, Michel Petit, Hervé Le Treut, Edouard Bard, Susan Solomon,  
Paul Caro, Vincent Courtillot, Georges Gonthier, Benjamin Werner, Pierre  
Buser, et al.

► **To cite this version:**

Jean Dercourt, Michel Petit, Hervé Le Treut, Edouard Bard, Susan Solomon, et al.. Évolution des climats. La lettre de l'Académie des Sciences, 21, 2007. hal-04863243

**HAL Id: hal-04863243**

<https://academie-sciences.hal.science/hal-04863243v1>

Submitted on 3 Jan 2025

**HAL** is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.



Distributed under a Creative Commons Attribution - NonCommercial - NoDerivatives 4.0  
International License



Publication de l'Académie  
des sciences

23, quai de Conti 75006 PARIS  
Tél: 01 44 41 43 68  
Fax: 01 44 41 43 84  
http: www.academie-sciences.fr

Directeur de publication  
Jean-François Bach

Directoire  
Jean-François Bach  
Jean Dercourt

Rédacteur en chef  
Paul Caro

Secrétariat général  
de la rédaction  
Marie-Christine Brissot

Conception & réalisation  
graphique  
Nicolas Guilbert

Photographies & illustrations  
couv. © CNRS Photothèque/IPEV P. Katell  
p. 2, 12, 22, Nicolas Guilbert  
p. 1, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 15, 16, 17, 18, 19 DR  
p. 20, 31, 32, 36 Académie des sciences  
p. 34 ENSPCI

Comité de rédaction  
Jean-François Bach, Édouard Brézin,  
Pierre Buser, Paul Caro, Pascale Cossart,  
Anne Fagot-Largeault, Jules Hoffmann,  
Gérard Huet, Jean-Pierre Kahane,  
Nicole Le Douarin, Jacques Livage,  
Dominique Meyer, Philippe Taquet

Photogravure & impression  
Edipro/PrintreferenceTM  
01 41 40 49 00

n° de C.P.: 0108 B 06337

Iceberg et glace  
pendant la débâcle,  
Terre Adélie, station  
Dumont d'Urville,  
Antarctique

DOSSIER

## Évolution des climats



INSTITUT DE FRANCE  
Académie des sciences



# Les journaux scientifiques dans le monde Le rôle de l'Académie des sciences

**L'**Académie des sciences a organisé les 14 et 15 mai 2007 un colloque intitulé : *Évolution des publications scientifiques, le regard des chercheurs*<sup>2</sup>. Pendant deux jours, institutions scientifiques, éditeurs et chercheurs ont confronté leurs points de vue sur l'évolution rapide de ce secteur. Ceci aidera l'Académie à adapter sa politique de publications ; elle est aujourd'hui la seule institution française à publier des revues cohérentes dans l'ensemble des sciences mathématiques, des sciences de la matière et des sciences biologiques.

Les usages de diffusion des travaux scientifiques varient selon les disciplines : les mathématiciens publient peu (un à trois articles par an, pas tous les ans) et le nombre de revues existant est plus faible que dans les autres disciplines, alors que les biologistes, qui publient beaucoup d'articles par an, disposent de revues très nombreuses ; quatre à cinq d'entre elles dominant nettement le marché.

## Les archives ouvertes

En 1991, une équipe de Los Alamos proposa aux auteurs de déposer en l'état leurs articles sur un site informatique, même s'ils n'envisageaient pas de les publier. Arkyve était né, suivi en France, une dizaine d'années après, par Hal (<http://hal.archives-ouvertes.fr/>). Ces sites internationaux se développent rapidement en physique puis en mathématiques et ils sont maintenant ouverts à toutes les disciplines. Rien d'équivalent n'existait au préalable.

## Les revues

La qualité d'édition des textes dans les revues est capitale pour le lecteur : la langue (anglaise souvent), les coquilles, les références bibliographiques et leurs appels

dans le texte, l'adéquation textes/figures, tout doit être vérifié. Il s'agit là d'un travail professionnel. Le manuscrit est examiné par des scientifiques avant d'être, soit imprimé, soit placé sur un site Internet, soit publié sous les deux formats. Les sept titres de l'Académie, regroupés dans les *Comptes Rendus*, achèvent actuellement la phase de transition en utilisant simultanément les deux supports. Le support informatique est préféré par la majorité des abonnés et des lecteurs.

La préservation des documents scientifiques est une nécessité et un souci : l'Académie l'a confiée à la Bibliothèque nationale de France, en accès libre ([www.gallica.fr](http://www.gallica.fr)).

## La diffusion

Dans le monde, plus d'un million d'articles sont publiés par an (quel qu'en soit le support), mais moins de la moitié est consultée. La diffusion électronique accroît considérablement l'impact des revues et est pleinement intégrée dans la culture des chercheurs.

Les téléchargements se développent et facilitent la lecture, donc les citations : il est aisé de passer de la référence bibliographique au texte complet de l'article recherché.

Ainsi, le nombre de téléchargements d'articles des est passé de 57 183 en 2001, à 482 292 en 2006 et à 127 472 pour les seuls trois premiers mois de 2007.

Le mode de financement des revues est assuré soit par le lecteur (abonnements), soit par l'auteur (paiement au dépôt du manuscrit).

Dans le premier cas, face à la multiplication des titres et au coût élevé des abonnements en France et dans de nombreux pays, les établissements de recherche et d'enseignement supérieur se sont regroupés en centres d'achat pour négocier les tarifs : les lecteurs relevant de ces établissements ont libre accès à ces revues, en bibliothèque sur support papier, et sur leurs ordinateurs per-



Par **Jean Dercourt**

Secrétaire perpétuel de l'Académie des sciences,  
professeur émérite à l'université Pierre et Marie Curie

sonnels. Ceci rend la documentation scientifique aussi naturellement accessible que le chauffage, l'électricité ou le Wi-Fi : elle fait partie des moyens de travail fournis par les établissements qui les accueillent.

Dans le deuxième cas, l'auteur achète un droit à être publié, ce qui risque de limiter sa liberté de publication : le choix de la revue par l'auteur cesse d'être un acte libre s'il dépend de la décision du responsable des crédits de chaque laboratoire, public ou privé.

Un très petit nombre de revues anglo-saxonnes sont des « news » scientifiques : elles informent sur les grandes interrogations et avancées de la science mondiale, sur des événements et sur des expressions d'opinions. Elles diffusent les articles récents, après de longues et rigoureuses expertises. Elles sont onéreuses mais sont intégrées par les différents centres d'achat et deviennent des passages obligés très recherchés car leurs facteurs d'impact sont élevés, là où les évaluations sont guidées par ce facteur.

Le facteur d'impact est un indicateur bibliométrique. Il est le rapport du nombre de citations, dans une année  $N$ , des articles publiés pendant les années  $N-1$  et  $N-2$  au nombre d'articles publiés pendant ces deux années. Les revues qui affichent un facteur d'impact fort sont les plus recherchées par les auteurs, qui en attendent de nombreuses citations de leurs articles. Ce facteur est totalement non significatif pour certaines disciplines où la durée de vie d'un article est de 5 ans, voire plus (mathématiques). En outre, s'il est significatif pour la notoriété d'une revue qui affiche un fort facteur impact, il ne l'est pas pour la qualité et les citations des articles qui y sont publiés, ni pour déterminer la diffusion réelle de chaque article : en effet, plus de la moitié des articles publiés ne sont jamais lus ou sont peu cités.

Le constat de l'importance excessive prise par cet indice pour le recrutement et l'évaluation des chercheurs conduira l'Académie à faire prochainement des propositions aux pouvoirs publics, dans le cadre de sa mission de conseil sur l'organisation de la recherche française.

L'indice de citation (citation d'un article par rapport à la citation nationale et mondiale) permet de prendre en considération l'indice de citation d'un article publié dans un pays par rapport à la production mondiale, d'un établissement par rapport à une liste d'autres établissements... Ces données sont fournies par ISI (Thomson Scientific) et sont maintenant aisément accessibles aux chercheurs et aux managers de la recherche. Si le facteur d'impact évalue la notoriété de la revue, seul l'indice de citation est significatif pour évaluer un établissement, une discipline dans un pays, une équipe et un chercheur au sein d'un établissement.

L'Académie tirera les enseignements de ce colloque pour évaluer son efficacité, en particulier en définissant sa politique éditoriale, variable selon les disciplines, pour satisfaire auteurs et lecteurs et continuer à répondre à ses missions ■

Les résumés des interventions et le contenu vidéo intégral de cette manifestation sont disponibles sur <http://www.academie-sciences.fr/conferences/colloques/>

La Lettre de l'Académie des sciences présente un dossier, coordonné par Michel Petit, sur le changement climatique, qui reflète les présentations scientifiques et les discussions qui ont eu lieu au cours de plusieurs réunions organisées au printemps 2007 par l'Académie. L'étude des changements climatiques a des conséquences scientifiques, économiques, sociales, politiques, et médiatiques. Pour cette raison, la présentation des connaissances scientifiques nécessaires à l'appréciation de l'évolution des climats n'est exempte ni de passions ni de controverses. On sait que la question de la pluie et du beau temps est l'un des principaux sujets de conversation dans le public, mais aussi une source réelle d'inquiétudes. La science impliquée est une activité de pointe internationale qui fait appel à des ressources variées en personnel de recherche comme en moyens techniques. La manière dont la communauté internationale aborde le problème est exposée en détails dans les articles qui composent ce dossier. L'évaluation du réchauffement climatique est d'autant plus difficile que dans son principe même elle exige de se projeter dans le futur de façon à proposer des modes d'action. C'est un art difficile dont les conjonctures ne pourront être jugées et appréciées qu'au siècle prochain... Notre dossier est une sorte de photographie des actions de recherche entreprises mais aussi des débats au sein de la communauté scientifique. Il expose l'état du savoir, les certitudes et les doutes, dans ce printemps 2007. Les chercheurs que nous avons sollicités ont mis toute leur compétence et leur passion dans leurs contributions. Les exposés faits au cours des réunions organisées par l'Académie feront l'objet d'une publication dans les *Comptes Rendus* de l'Académie des sciences.

**Paul Caro**

Par **Michel Petit**

Correspondant de l'Académie des sciences



# Les connaissances sur le changement climatique mondial

## L'histoire de la prise de conscience du problème

**L**a problématique du réchauffement climatique lié aux activités humaines a été identifiée bien avant que le phénomène ne commence à se matérialiser. Dès 1896, un scientifique suédois, Svante Arrhénius qui obtiendra plus tard le prix Nobel, avait noté que la civilisation industrielle était fondée sur une large utilisation des combustibles fossiles comme le charbon, le pétrole et le gaz naturel et que cette combustion entraînait des émissions de gaz carbonique. Il avait examiné le cycle du carbone et conclu que ces émissions allaient, à échéance relativement brève, provoquer un doublement de la concentration de ce gaz dans l'atmosphère et provoquer, par effet de serre, une augmentation de la température moyenne du globe de l'ordre de 4 degrés. Les travaux d'Arrhénius constituaient un développement des remarques que Joseph Fourier avait faites en 1826 sur le rôle de l'atmosphère sur la température de notre planète. À partir de la fin des années 1950, les progrès scientifico-techniques ont permis aux géophysiciens et aux géochimistes de modéliser le comportement du carbone et l'influence du changement de la composition atmosphérique sur le climat global. À partir de 1958, on a commencé à mesurer soigneusement la teneur de l'atmosphère en gaz carbonique. En 1967 l'Organisation météorologique mondiale (OMM), en collaboration avec le Conseil international des unions scientifiques (appelé aujourd'hui Conseil international pour la Science) (ICSU), la principale organisation scientifique non gouvernementale qui regroupe les académies des sciences de la quasi-totalité des pays et les grandes unions scientifiques internationales couvrant l'ensemble des disciplines scientifiques, ont établi le Programme mondial de recherche atmosphérique (GARP). En 1980 l'ICSU et l'OMM ont créé conjointement

le Programme mondial de recherche sur le climat (PMRC), programme auquel s'est associée ultérieurement la Commission océanographique internationale. En 1986 l'ICSU a lancé le Programme international Géosphère-Biosphère (PIGB). Ce sont essentiellement ces programmes qui ont été à l'origine des nombreuses publications scientifiques qui constituent le matériel de base sur lequel se sont appuyés les scientifiques concernés pour alerter l'opinion publique sur un danger qu'ils étaient seuls à appréhender, il y a une vingtaine d'années.

Leurs avertissements sont accueillis de façons diverses. Pour les plus extrémistes des militants écologistes, le changement climatique apparaît comme une des preuves des méfaits du progrès technique. Ils ne retiennent que les valeurs supérieures des fourchettes de température calculées par les scientifiques, mettent en avant les conséquences les plus néfastes qu'on puisse imaginer et généralement sombrent dans un catastrophisme que certains média relayent avec complaisance. Cet excès de pessimisme peut accélérer la prise de conscience d'un problème réel. À l'inverse, il peut conduire à décrédibiliser par ses outrances l'existence même d'un sérieux sujet de préoccupation.

Les scientifiques sont très généralement des passionnés qui vivent avant tout pour leur discipline. Il est donc légitime de se demander s'ils n'ont pas tendance collectivement à mettre l'accent sur des phénomènes qui conduiront les décideurs à s'intéresser à leurs travaux et à les financer plus largement et pour cela à dramatiser la situation, en mettant l'accent sur les hypothèses qui conduisent aux résultats les plus inquiétants. Certains tirent argument de cette faiblesse possible pour affirmer que les météorologues ont inventé de toute pièce le réchauffement climatique. On peut cependant leur rétorquer que l'enjeu économique international est tel



que les États producteurs de combustibles fossiles et les grandes compagnies internationales pétrolières feraient des ponts d'or à tout scientifique qui concevrait un programme de recherche permettant de montrer que le réchauffement climatique sera moins important que ne l'estiment les travaux actuels.

L'amour de leur discipline scientifique a pu au contraire conduire les chercheurs intéressés par d'autres domaines à réagir instinctivement contre l'idée d'un changement climatique induit par les activités humaines. Leur opposition était d'autant plus naturelle qu'il n'entraînait pas dans leurs habitudes de pensée que des phénomènes naturels majeurs puissent être concernés par des événements créés par l'homme sur une brève période. D'une façon un peu analogue, certains géographes climatologues mettent en doute le changement climatique, car ils ne font confiance qu'à leurs méthodes traditionnelles qui se fondent sur la description des climats effectivement observés. Or la problématique du changement climatique a émergé de l'étude scientifique du fonctionnement de la machine climatique, même si les observations mettent de mieux en mieux en évidence la réalité concrète de ce changement.

### 2007, l'année du quatrième rapport d'évaluation du GIEC

Le Groupe intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC), plus connu dans le monde sous son nom anglais, Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), a été créé en 1988 par l'Organisation météorologique mondiale (OMM) et le Programme des Nations unies pour l'environnement (PNUE). Il regroupe tous les États membres de l'une ou l'autre de ces deux organisations. Sa mission est d'évaluer l'état des connaissances (y compris les incertitudes et les controverses scientifiques) sur les questions politiquement pertinentes pour l'élaboration des actions possibles face au changement climatique, en se gardant soigneusement de suggérer quelque décision que ce soit.

Le GIEC comprend actuellement trois groupes de travail qui se consacrent respectivement :

- 1/ au phénomène du changement climatique,
- 2/ aux conséquences de ce changement et à ce qu'on peut faire pour s'y adapter,
- 3/ aux possibilités de maîtriser les émissions de gaz à effet de serre qui en régissent l'amplitude.

Les divers chapitres des rapports du GIEC sont rédigés bénévolement par des chercheurs et seules quelques personnes assurant, pour chaque groupe de travail, un support technique d'ensemble, sont rémunérées. Ces chercheurs, choisis par le bureau (lui-même composé de scientifiques) parmi les spécialistes mondiaux du sujet, soumettent leur projet de rapport à une double

procédure de relecture critique. Leur première version est relue par un groupe ouvert d'experts de toutes origines. Les commentaires reçus sont examinés un par un et utilisés pour la rédaction d'une deuxième version. Cette deuxième version est soumise à tous les experts ayant commenté la première, ainsi qu'à tous les gouvernements qui sont invités à envoyer chacun une liste unique de remarques. Cette deuxième série de critiques est traitée exactement comme la première. Il en résulte une troisième version qui est soumise à l'approbation de l'assemblée générale.

En outre, le bureau de chaque groupe de travail organise la rédaction d'un sommaire pour décideurs, soumis lui aussi à une double revue. Ce sommaire qui résume les résultats les plus pertinents de tous les chapitres en une dizaine de pages de texte et autant de pages de figures et de tableaux, est adopté mot à mot par l'assemblée générale qui lui apporte des amendements jugés par les auteurs comme compatibles avec la vérité scientifique.

Ce processus rigoureux et lourd, nécessitant plusieurs années de travail, permet au GIEC de produire des rapports qui sont considérés comme fidèles par la communauté scientifique et comme objectifs par tous les États sans exception, quels que soient leurs intérêts propres. Cette alchimie miraculeuse est obtenue en donnant à chacune des deux parties prenantes un poids qui varie au cours des diverses étapes : les politiques choisissent collectivement des équipes scientifiques compétentes et équilibrées, puis laissent quartier libre aux scientifiques pour rédiger leur rapport et reprennent la main lors de l'adoption finale, tout en restant à l'écoute des scientifiques et sous la présidence de scientifiques qui maintiennent le débat sur le plan de l'objectivité de la rédaction proposée.

L'année 2007 est l'année de publication du quatrième rapport d'évaluation du Groupe intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC). Les trois rapports précédents datent de 1990, 1995, et 2001. Le rapport du premier groupe de travail a été approuvé début février, celui du deuxième début avril et celui du troisième début mai. Un rapport de synthèse sera soumis à l'approbation d'une assemblée plénière à la mi-novembre. Ces rapports, rédigés par des scientifiques, sont destinés à fournir aux décideurs l'état des connaissances scientifiques et techniques pertinentes, permettant d'éclairer les décisions qu'ils ont à prendre pour faire face au risque d'un changement climatique mondial. Ces décisions concernent à la fois les mesures permettant de se préparer à affronter un nouveau climat et les mesures visant à limiter l'amplitude du changement climatique à des valeurs « non dangereuses », pour paraphraser l'article 2 de la convention sur le changement climatique adoptée lors de la Conférence des Chefs d'État, à Rio, en 1992.

### Qu'est-ce qui détermine la température de la Terre ?

La Terre dispose d'un « chauffage central » dû à l'énergie émise lors de la désintégration des noyaux radioactifs qu'elle contient. Joseph Fourier en 1826 a commencé par étudier ce transfert de chaleur, avant d'arriver à la conclusion qu'il était négligeable, par rapport à l'absorption d'une partie de l'énergie du rayonnement solaire qu'elle reçoit. A cause de cet apport de chaleur, sa température a tendance à augmenter jusqu'à ce qu'elle parvienne à évacuer une quantité d'énergie équivalente à celle qu'elle absorbe. La Terre est isolée dans le vide interplanétaire et la seule manière dont elle puisse perdre de l'énergie est de rayonner dans l'espace, comme le fait le Soleil, à ceci près que ce rayonnement est infrarouge et donc non visible. Sa température d'équilibre s'établit à une valeur qui lui permet d'émettre dans l'infrarouge une énergie égale à l'énergie solaire qu'elle absorbe. L'augmentation observée de la concentration de gaz, comme le dioxyde de carbone, le méthane ou le protoxyde d'azote, qui absorbent le rayonnement infrarouge, a pour effet de diminuer le rayonnement que la Terre émet dans l'espace. Sa température augmente puisqu'elle perd moins d'énergie qu'elle n'en reçoit. Un nouvel équilibre est atteint lorsque l'augmentation de température provoque un rayonnement plus intense compensant l'absorption induite par le changement de composition de l'atmosphère. C'est ce qu'on appelle l'effet de serre, car il se produit dans les serres de jardinier ou d'horticulteur et explique partiellement la chaleur qui y règne.

L'atmosphère de la Terre contient naturellement du gaz carbonique depuis bien longtemps et l'effet de serre correspondant lui a donné une température supérieure d'une trentaine de degrés à ce qu'elle serait en l'absence de ce gaz. C'est donc cet effet qui a permis le développement des formes de vie qui nous sont familières. La planète Vénus est plus chaude de quelques centaines de degrés que la Terre et la planète Mars plus froide d'une centaine de degrés. Ces différences observées ne peuvent être expliquées qu'en prenant en compte la quantité de CO<sub>2</sub> contenue dans leur atmosphère, qu'on a mesurée de façon fiable. L'effet de serre est naturellement présent dans la nature et n'a rien de nocif en soi. Par contre, les hommes ne peuvent changer impunément la composition de l'atmosphère de leur planète, sans en modifier le climat. Dans la pratique, on désigne souvent cet effet de serre additionnel sous le vocable abrégé "d'effet de serre", alors qu'on devrait, en toute rigueur, parler d'effet de serre "additionnel" provoqué par les émissions liées aux activités humaines.

### L'évolution du climat de la Terre

Le climat de la Terre évolue sous l'influence de causes naturelles qui ont toujours existé et continueront à jouer un rôle.

- Tout d'abord, la Terre ne tourne pas toujours de

la même façon autour du Soleil, à cause de l'attraction des autres planètes et de la Lune : l'axe de rotation autour duquel la planète tourne sur elle-même en un jour est plus ou moins incliné par rapport au plan dans lequel elle accomplit sa rotation annuelle autour du Soleil, l'aplatissement de l'ellipse qu'elle décrit dans ce plan est plus ou moins marqué, le mois au cours duquel la Terre est au plus près du Soleil varie régulièrement. Toutes ces variations se produisent lentement, avec des périodes qui se mesurent en dizaines de milliers d'années. Elles provoquent des changements dans la manière dont le Soleil éclaire notre planète de l'angle et sont à l'origine des grands cycles glaciaires interglaciaires qui ont une amplitude de l'ordre de 6 °C et une période de 100 000 ans. Nous sommes depuis 10 000 ans dans une période interglaciaire, donc chaude.

- Le Soleil connaît lui-même une variabilité qui se manifeste en particulier par la présence de taches dont le nombre varie avec un cycle de 11 ans. Toutefois, ce cycle affecte le rayonnement solaire essentiellement dans la gamme de l'ultraviolet et se retrouve donc dans le comportement des parties les plus élevées de l'atmosphère terrestre qui l'absorbe : ionosphère (altitude de 100 km et au-delà) et, dans une moindre mesure, stratosphère (altitude d'environ 30 km). Il n'affecte que peu l'énergie totale rayonnée et son influence est détectée, mais très faible dans les phénomènes climatiques. Des variations à long terme du rayonnement total, comme un accroissement depuis le minimum, dit de Maunder, observé à la fin du XVII<sup>e</sup> siècle dans le nombre de taches solaires, sont possibles, mais d'amplitude limitée et ne sauraient expliquer les variations du climat, au cours des dernières décennies.

- Un autre paramètre jouant un rôle sur la température au sol est l'activité volcanique. Lors des fortes éruptions volcaniques, des poussières atteignent la stratosphère (au-dessus de 15 km) et peuvent y rester pendant une ou deux années avant de retomber vers le sol. Ces particules constituées essentiellement d'oxydes de soufre jouent un rôle d'écran pour le flux solaire incident, ce qui a pour effet de refroidir la surface. Lors de la dernière grande éruption du mont Pinatubo en 1991, un tel refroidissement de 0,5 °C a été observé sur une grande partie de la planète. Mais ces effets sont de courte durée (1 à 2 ans). Ils représentent seulement une source de variabilité, mais ne peuvent expliquer la montée des températures que l'on observe de façon quasi continue au cours des 30 dernières années.

Les activités humaines ont, depuis le début de l'ère industrielle, ajouté à ces causes naturelles de nouvelles causes de variation liées au changement de la composition de l'atmosphère qu'elles induisent. Tous les résultats et toutes les figures présentés ci-dessous sont tirés



des rapports du GIEC. La figure 1 montre les variations des concentrations atmosphériques du dioxyde de carbone, du méthane et du protoxyde d'azote depuis les 10 000 dernières années, le cartouche inséré dans chaque panneau détaillant l'évolution au cours des deux derniers siècles.

L'origine de cette variation observée de la composition de l'atmosphère est suggérée par la coïncidence entre l'augmentation brutale observée et le début de l'ère industrielle. Parmi les gaz à effet de serre, le dioxyde de carbone (CO<sub>2</sub>) est celui qui provoque le réchauffement le plus important. De plus, l'analyse du cycle du carbone montre que son action est celle qui dure le plus longtemps. Il est donc naturel de lui porter une attention particulière. L'énergie commercialisée dans le monde provient pour 80 % de la com-

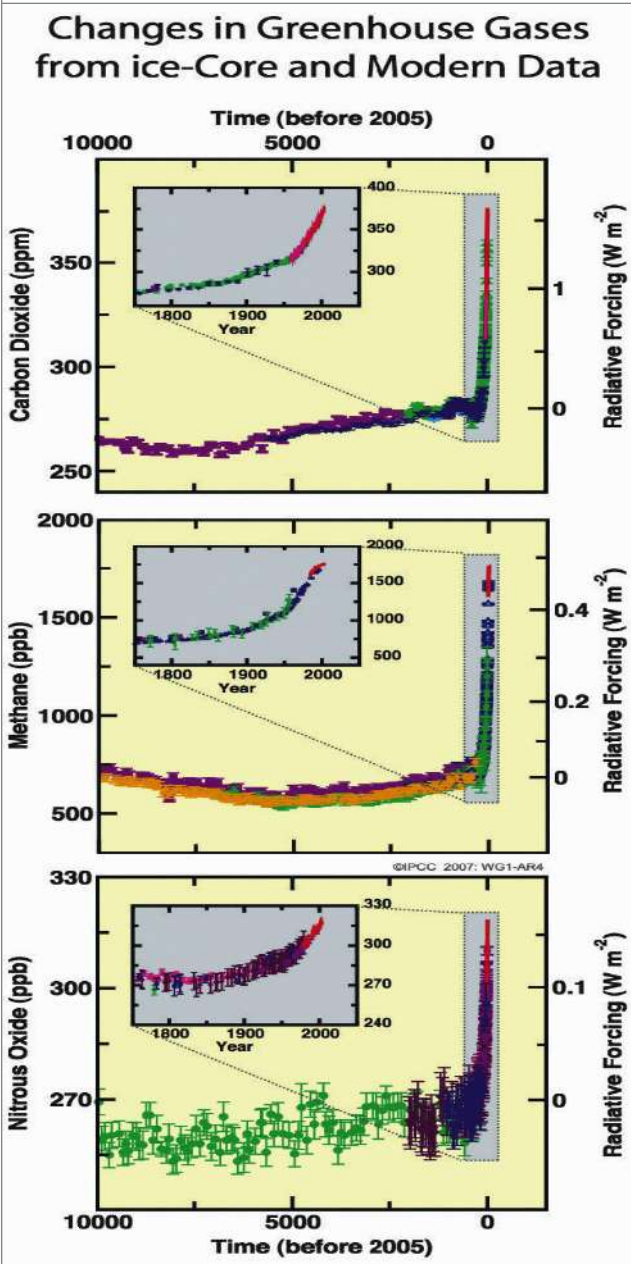


Figure 1 - Variation de la composition de l'atmosphère. Les teneurs sont exprimées en parties par million (ppm), c'est-à-dire le nombre de molécules du gaz considéré qu'on trouve dans un million de molécules d'air.

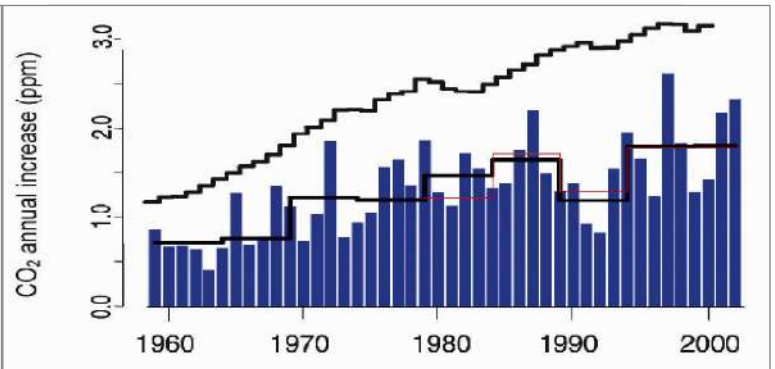


Figure 2- Comparaison des émissions de CO<sub>2</sub> avec l'évolution de la concentration observée

bustion du charbon, du pétrole et du gaz qui sont extraits du sous-sol, en quantités parfaitement connues. La courbe en noir du haut de la figure 2

montre ce qu'aurait été l'évolution de la concentration en CO<sub>2</sub> dans l'atmosphère, si la totalité du CO<sub>2</sub> produit de la combustion du carbone fossile y était restée. Les barres bleues indiquent l'augmentation observée qui n'est que la moitié environ de la précédente, le reste ayant été absorbé par l'océan et la biosphère terrestre. L'utilisation des combustibles fossiles suffit donc largement à expliquer le changement de la teneur de l'atmosphère en CO<sub>2</sub>.

Cette interprétation est corroborée par la mesure de la composition isotopique du carbone atmosphérique et par une diminution très faible, mais mesurée, de l'oxygène atmosphérique dont un peu a été utilisé pour fabriquer le CO<sub>2</sub> excédentaire. L'origine humaine de ce dernier n'est donc mise en doute par personne. Bien entendu, le phénomène que nous venons de décrire se superpose aux échanges naturels équilibrés entre l'atmosphère et le sol, qui sont de l'ordre de 120 milliards de tonnes de carbone par an et entre l'atmosphère et l'océan, qui sont estimés à 90 milliards de tonnes par an.

### Le changement climatique observé

L'augmentation observée de la teneur en gaz à effet de serre de l'atmosphère se traduit, comme l'avait prévu Svante Arrhénius en 1896 et comme le simulent les modélisations numériques modernes, par un effet de serre additionnel entraînant une augmentation de la température moyenne du globe estimée à 0,8 degrés (à plus ou moins 0,2 degrés près) par rapport à l'ère préindustrielle. Les 12 dernières années sont les années les plus chaudes jamais enregistrées depuis 1850, à une exception près, 1996. Ce réchauffement n'est pas uniformément réparti, les océans dont l'effet régulateur sur les températures est bien connu se réchauffant naturellement moins que les continents. En outre, l'accroissement de la température est particulièrement fort dans les régions les plus septentrionales d'Amérique, d'Europe et d'Asie. Les précipitations sont également affectées par ce changement climatique, certaines régions étant plus arrosées et d'autres moins.

Les modèles simulant sur ordinateur la circulation des masses d'air dans l'atmosphère et des masses d'eau dans l'océan constituent la base des prévisions météorologiques actuelles. Ils peuvent être adaptés au calcul du changement du climat provoqué par une évolution donnée de la composition atmosphérique. On peut ainsi vérifier que les observations sont correctement expliquées par la prise en compte de l'effet de serre dû au changement observé de la composition de l'atmosphère, lui-même provoqué par les activités humaines (figure 3). L'attribution du réchauffement observé à ce dernier phénomène ne résulte donc pas de vagues corrélations statistiques, mais de la reproduction des observations par les modélisations de processus physiques qui régissent le comportement de la machine océan-atmosphère.

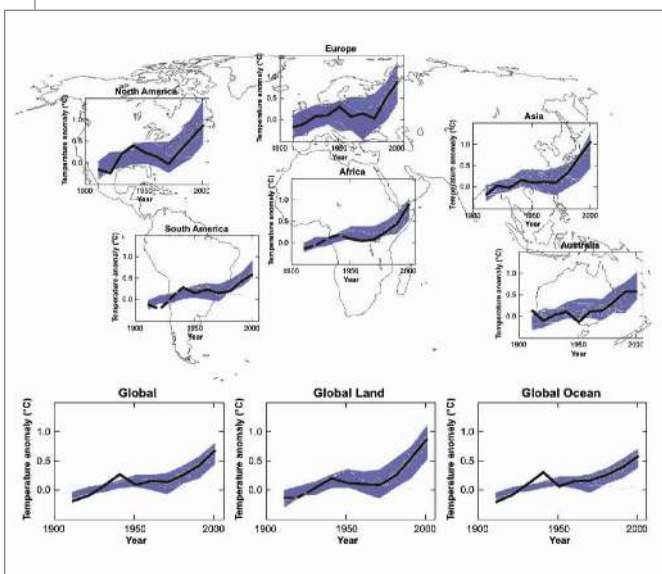


Figure 3- Changements de la température de l'air à la surface de la Terre, à l'échelle mondiale et continentale de 1906 à 2005, par rapport à sa valeur moyenne pour la période 1901-1950, comparés avec les simulations des modèles numériques. Les lignes noires indiquent les changements observés et sont pointillées lorsque les données disponibles couvrent moins de 50 % de la surface concernée. Les bandes bleues correspondent à des simulations ne prenant en compte que les phénomènes naturels et les bandes rouges à des simulations prenant en compte à la fois l'effet des phénomènes naturels et celui des phénomènes résultant des activités humaines. Les trois panneaux du bas correspondent de gauche à droite à la moyenne mondiale, à la moyenne des terres émergées et à la moyenne des océans.

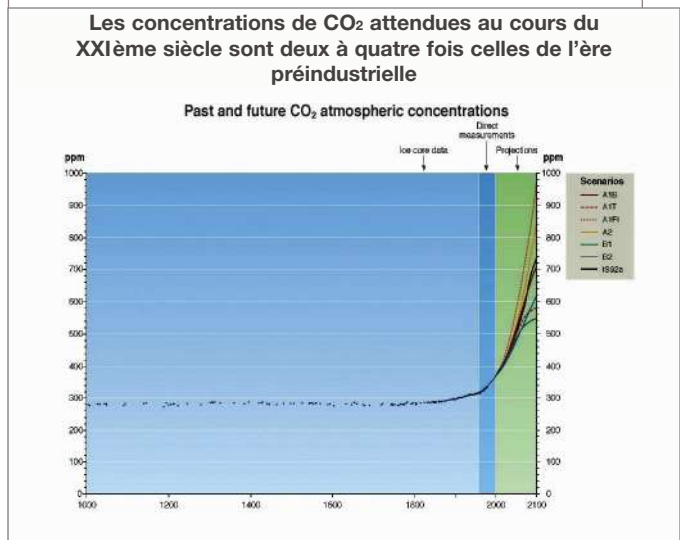
### Ce qui pourrait arriver au cours de ce siècle

#### Le changement climatique mondial attendu

Les besoins énergétiques de l'humanité ne cessent de croître, tant à cause de la croissance de la population mondiale que du développement économique de certains pays. Cette énergie est produite actuellement pour 80 % à partir de combustibles fossiles. En l'absence d'actions volontaristes, les émissions de gaz carbonique croîtront dans les prochaines décennies et il s'en suivra une augmentation de la concentration du gaz carbonique dans l'atmosphère. Divers scénarios vraisem-

blables ont été construits pour de telles évolutions non interventionnistes et ils conduisent à des concentrations allant de 550 à 1 000 ppm (figure 4).

Les modèles numériques permettent de calculer l'évolution de la température moyenne mondiale correspondant à chaque scénario. Cependant, les modèles ne sont pas parfaits, ils sont en particulier incapables de simuler en des temps de calcul raisonnables des phénomènes de taille inférieure à 300 km. Il en résulte que les températures prévues sont entachées d'une incertitude. Les barres à droite de la figure 5 sont relatives à la température prévue en 2100. On voit que si on associe la concentration la plus faible à la partie basse de la barre correspondante, l'augmentation de température prévue est de 1 degré et que si, à l'opposé, on associe la concentration la plus forte à l'extrémité haute de la barre, on trouve 6,4 degrés. C'est donc



dans cette fourchette qu'on peut s'attendre à trouver l'augmentation de la température moyenne mondiale à la fin du siècle, en

l'absence d'actions volontaristes. Les conséquences de telles variations de la température moyenne mondiale sont importantes puisque l'écart de 5 degrés qui existe entre une ère glaciaire et un optimum interglaciaire, c'est-à-dire entre les périodes les plus froides et les périodes les plus chaudes des grands cycles climatiques naturels, entraîne un bouleversement de la géographie du monde, reconstitué par les géologues.

#### La répartition géographique du réchauffement

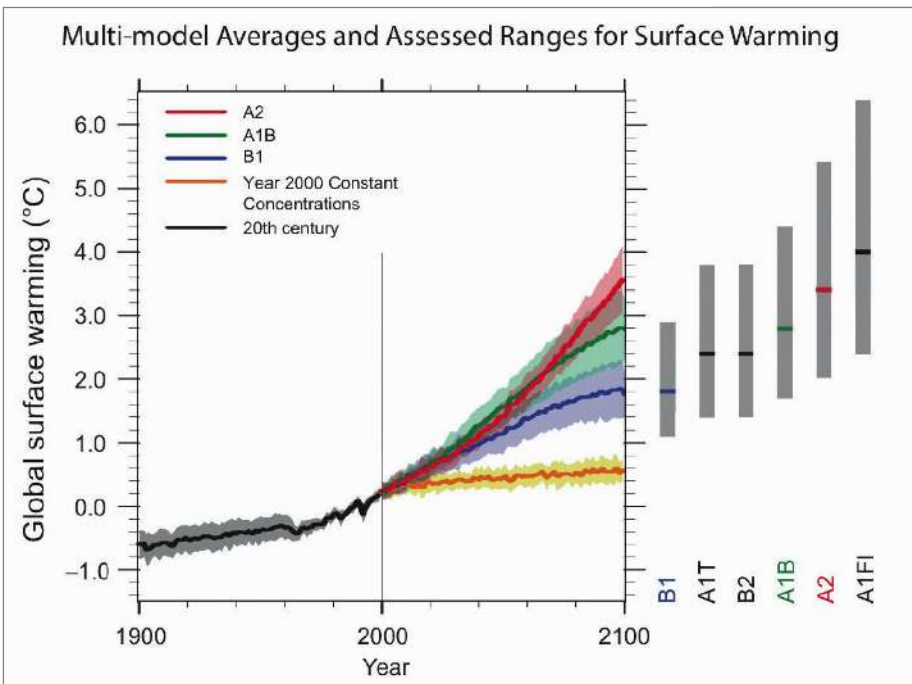
L'augmentation de température prévue n'est pas uniforme, les continents se réchauffant plus que les océans et les parties septentrionales subissant le réchauffement le plus fort (voir figure 6).

#### Le changement des précipitations

La moyenne mondiale des précipitations devrait croître. La figure 7 montre que certaines régions comme le nord de l'Europe seront plus arrosées tandis que le Bassin

Figure 3- Scénarios d'évolution de la concentration du gaz carbonique dans l'atmosphère, en l'absence de toute action volontariste pour réduire les émissions





méditerranéen sera confronté à une sécheresse accrue. On observera davantage de phénomènes pluvieux intenses, même dans les régions plus sèches.

**Les conséquences du changement climatique**

Les changements climatiques affectent déjà des systèmes physiques et biologiques sur tous les continents : retrait des glaciers de montagne, risque de chutes de rochers et de glaces, glissements de terrain, réduction de l'étendue et de l'épaisseur de la glace de mer arctique en été, floraisons précoces et périodes plus longues de croissance des

plantes et de reproduction des animaux, migration en latitude et en altitude des plantes, des poissons, des oiseaux, des insectes, etc. Il est quasi impossible que la cohérence entre les changements observés et le changement climatique actuel soit due au hasard (figure 8).

Figure 5- Augmentation de la température moyenne de surface par rapport à la période 1980-99. Les courbes colorées montrent, en continuité avec les simulations relatives au XX<sup>e</sup> siècle les variations pour les scénarios A2, A1B et B1, ainsi que pour un scénario irréaliste où les concentrations seraient restées constantes à leur valeur de 2000 et qui présente l'intérêt de montrer le réchauffement auquel nous condamnons les émissions passées. Les zones colorées donnent une indication de la dispersion des simulations. Dans les barres de droite, le trait horizontal indique la valeur la plus probable pour le scénario d'émissions considéré et l'étendue des barres indique la gamme des valeurs vraisemblables.

Figure 6- Répartition mondiale de l'augmentation de température pour 3 scénarios (en lignes) et trois périodes (en colonnes)

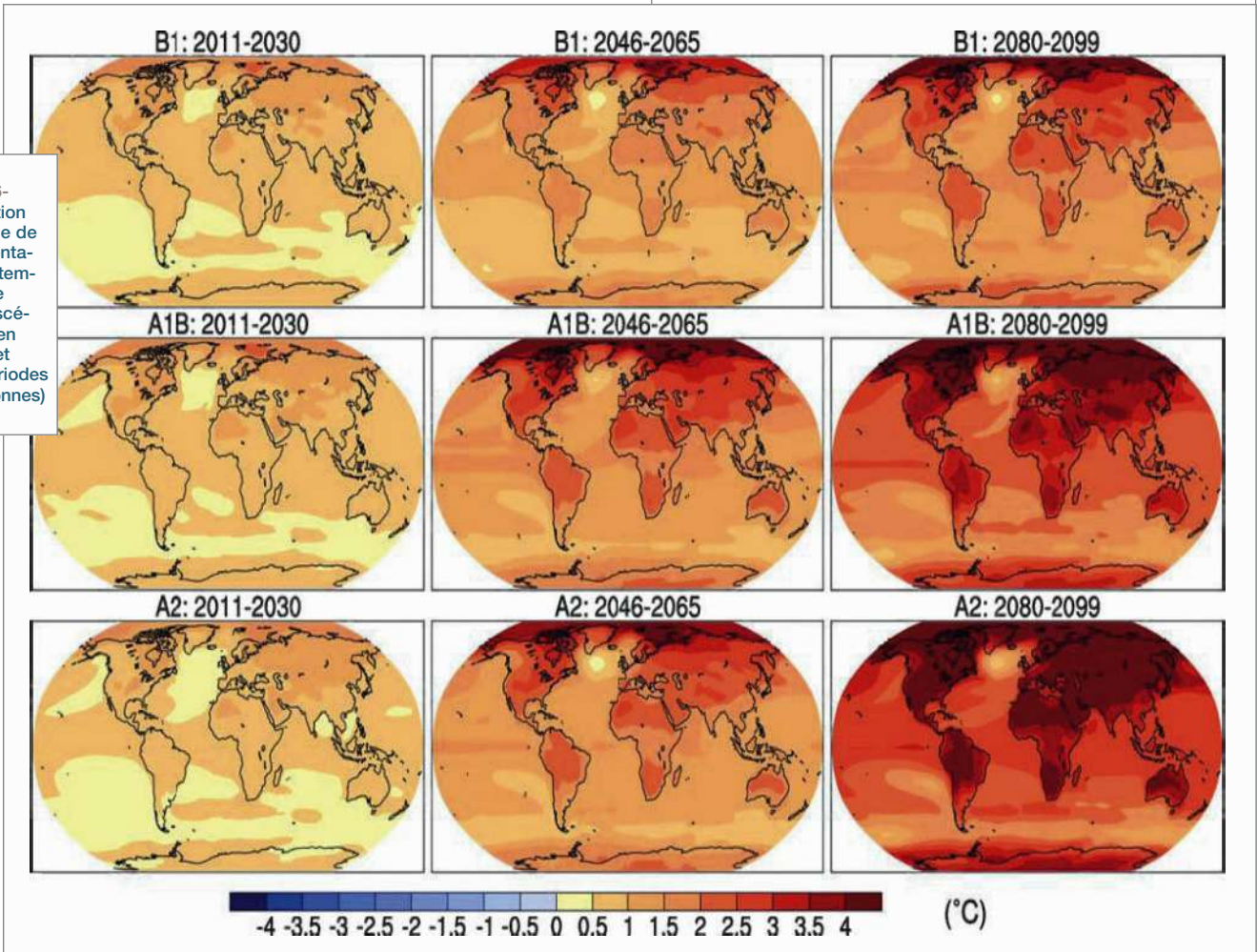
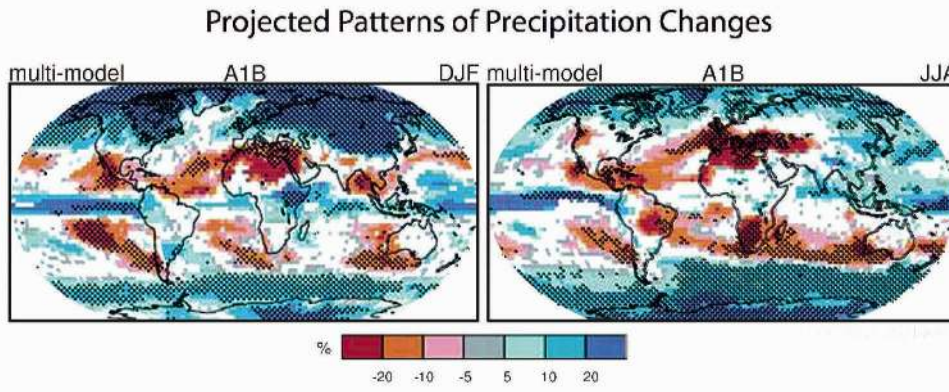


Figure 7- Changements des précipitations en pourcentage pour la période 2090–2099, par rapport à 1980–1999. Ces valeurs correspondent à la moyenne des modélisations pour le scénario moyen d'émissions A1B pour les mois de décembre à février (à gauche) aux mois de juin à août (à droite). Les zones blanches sont celles où moins des deux tiers des modèles donnent un changement de même signe et les zones pointillées sont celles où plus de 90 % des modèles donnent des changements de même signe.



D'ici à 2050, les simulations du débit moyen annuel des rivières et de la disponibilité en eau montrent une augmentation de 10 à 40 % aux hautes latitudes et dans certaines zones tropicales humides et une diminution de 10 à 30 % dans certaines régions sèches des latitudes moyennes et tropicales arides, dont certaines sont actuellement en manque d'eau. À certains endroits et pour certaines saisons, les changements peuvent différer de ces tendances annuelles globales. Les surfaces touchées par la sécheresse vont probablement s'étendre. Les événements de fortes précipitations, dont la fréquence augmentera très probablement, aggraveront les risques d'inondation. On s'attend à un déclin des ressources en eau stockées dans les glaciers ainsi que dans la couverture neigeuse, réduisant la disponibilité en eau dans certaines régions alimentées par l'eau de fonte provenant des grandes chaînes de montagne, où plus d'un sixième de la population mondiale vit actuellement.

Approximativement 20 à 30 % des espèces végétales et animales étudiées jusqu'ici connaîtront probablement un risque d'extinction si l'augmentation de température moyenne mondiale dépasse 1.5-2,5 °C. Pour une augmentation de la température moyenne globale de plus de 1.5-2,5 °C associée à une croissance de la concentration atmosphérique en CO<sub>2</sub>, on s'attend à des changements importants dans la structure et la fonction des

écosystèmes, les interactions écologiques entre les espèces et les aires de répartition des espèces, avec des conséquences négatives pour la biodiversité et les biens et services des écosystèmes, par exemple les ressources en eau et en produits alimentaires. L'acidification progressive des océans due à l'accroissement du gaz carbonique atmosphérique devrait avoir des effets négatifs sur les organismes qui fabriquent une coquille et les espèces qui en dépendent.

Les rendements agricoles devraient augmenter légèrement dans les régions de moyennes et

hautes latitudes pour des augmentations moyennes locales de température jusqu'à 1 à 3 °C selon la culture considérée et devraient diminuer pour des températures plus élevées, dans certaines régions. Aux latitudes plus basses, particulièrement dans les régions ayant des saisons sèches et dans les régions tropicales, les rende-

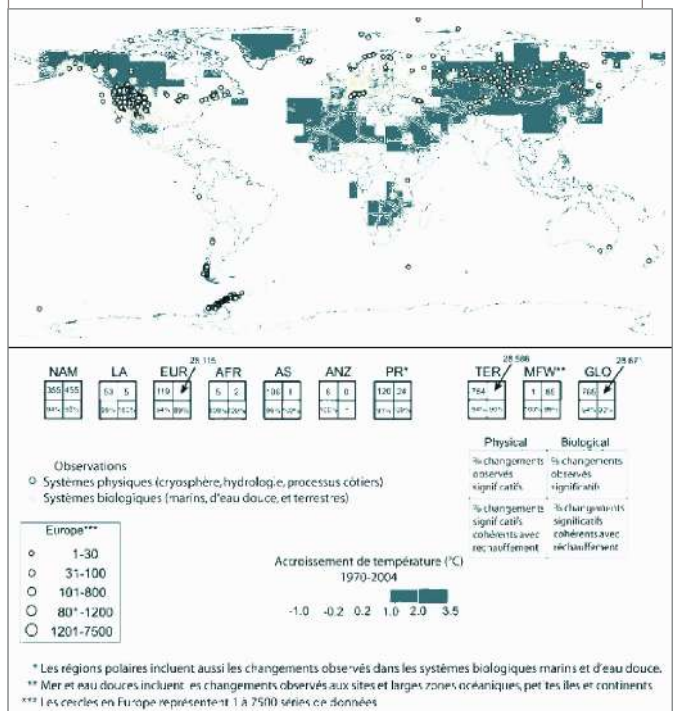


Figure 8- Les emplacements des changements significatifs dans les systèmes d'observation des systèmes physiques (neiges, glaces et sols gelés ; hydrologie ; processus côtiers) et des systèmes biologiques (terrestres, marins, et d'eau douce) sont représentés avec les changements de la température de surface sur la période 1970-2004. Un sous-ensemble d'environ 29 000 séries de données a été sélectionné parmi environ 80 000 séries de données issues de 577 études. Ces séries devaient se conformer aux critères suivants : (1) Se terminer en 1990 ou plus tard ; (2) couvrir une période d'au moins 20 ans ; et (3) montrer un changement significatif, quelle qu'en soit la direction, dans les conditions fixées pour les études individuelles. Ces séries de données proviennent d'environ 75 études (parmi lesquelles 70 environ sont nouvelles depuis le troisième rapport d'évaluation) contenant environ 29 000 séries de données, dont environ 27 800 proviennent d'études européennes. Les régions de couleur blanche ne contiennent pas assez de données d'observation climatologiques pour estimer une tendance de la température. Les boîtes 2x2 présentent le nombre total de séries montrant des changements significatifs (ligne du haut) et le pourcentage de celles-ci qui sont cohérentes avec le réchauffement (ligne du bas) pour (i) les régions continentales : Amérique du Nord (NAM), Amérique latine (LA), Europe (EUR), Afrique (AFR), Asie (AS), Australie et Nouvelle-Zélande (ANZ), et les régions polaires (PR) et (ii) l'échelle globale : régions terrestres (TER), marines et d'eaux douces (MFW) et ensemble du globe (GLO). La somme des nombres d'études apparaissant dans les sept boîtes régionales (NAM... PR) ne correspond pas au nombre d'études globales (GLO) parce que les études dans ces régions (sauf les régions polaires) ne contiennent pas les études sur les systèmes marins et d'eaux douces.



ments agricoles potentiels auront tendance à diminuer, même pour de faibles augmentations locales de température (1 à 2 °C), ce qui augmentera le risque de famine. Globalement, le potentiel de production alimentaire devrait croître avec l'augmentation de température moyenne locale pour une gamme de 1 à 3 °C, mais au-dessus de ces valeurs, il devrait diminuer. Des adaptations telles que le changement des cultivars et des époques de plantation permettent de maintenir la production de céréales aux moyennes et hautes latitudes au niveau ou au dessus du niveau de production de base pour un réchauffement modeste. Globalement, la productivité de la sylviculture devrait s'accroître modestement avec les changements climatiques dans le moyen et long terme, avec une large variabilité autour de la tendance globale.

Les côtes seront, exposées à des risques croissants, y compris l'érosion, dus aux changements climatiques et à la hausse de niveau de la mer. L'effet sera aggravé par les pressions humaines croissantes sur les régions côtières. Des millions de personnes supplémentaires seront probablement inondées chaque année suite à l'élévation du niveau de la mer dans les années 2 080. Les zones très peuplées et de faible altitude où la capacité d'adaptation est relativement faible et qui sont déjà confrontées à d'autres défis tels que des tempêtes tropicales ou la subsidence locale de la côte sont particulièrement vulnérables. Le nombre de personnes touchées sera le plus grand dans les très grands deltas d'Asie et d'Afrique,

Figure 9- Rappel de la mortalité à Paris lors de la vague de chaleur de 2003.

Le nombre de personnes touchées sera le plus grand dans les très grands deltas d'Asie et d'Afrique,

tandis que les petites îles sont particulièrement vulnérables.

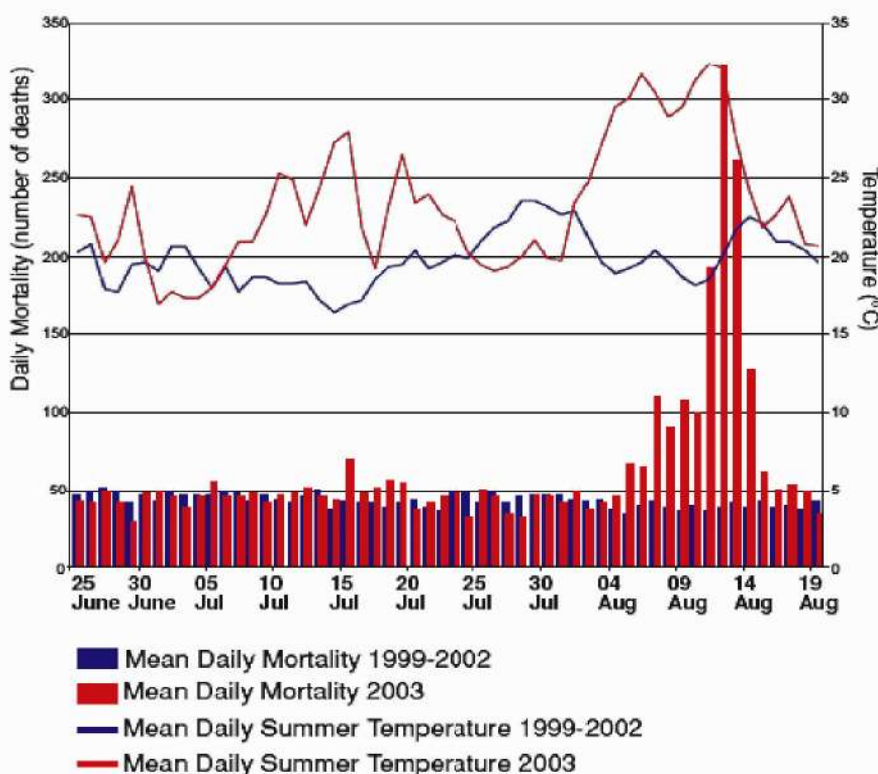
Les projections des changements climatiques affecteront probablement l'état de santé de millions de personnes, particulièrement celles qui ont une faible capacité d'adaptation, par :

- accroissement de la malnutrition et de ses conséquences, avec des implications sur la croissance et le développement des enfants ;
- accroissement du nombre de décès, maladies et accidents dus aux vagues de chaleur (figure 9), aux inondations, aux tempêtes, aux feux et aux sécheresses ;
- accroissement de la prévalence des maladies diarrhéiques ;
- accroissement de la fréquence des maladies cardiorespiratoires dues à des concentrations plus élevées d'ozone au voisinage du sol liées aux changements climatiques ;
- modification de la répartition spatiale de certains vecteurs de maladie infectieuse.

### La maîtrise du changement climatique

Pour stabiliser la concentration des GES dans l'atmosphère, les émissions mondiales doivent passer par un maximum et décroître ensuite. Plus le niveau de stabilisation est faible, plus le maximum et la décroissance doivent se produire tôt. Les efforts de réduction des émissions de gaz à effet de serre au cours des deux ou trois prochaines décennies détermineront dans une large mesure l'accroissement à long terme de la température moyenne mondiale et

les conséquences correspondantes du changement climatique qui pourront être évitées. Le tableau ci-dessus résume les résultats d'un certain nombre d'études récentes étudiant la possibilité de stabiliser la concentration des gaz à effet de serre à divers niveaux. La 1<sup>ère</sup> colonne est le niveau de stabilisation recherché pour le CO<sub>2</sub> seul, la 2<sup>e</sup> exprime la concentration en CO<sub>2</sub> seul qui aurait le même pouvoir réchauffant que la totalité des gaz à effet de serre pris en compte. La 3<sup>e</sup> colonne représente l'accroissement de la température par rapport à la valeur préindustrielle, calculé en utilisant la valeur la plus probable de la sensibilité climatique, soit 3 °C. La 4<sup>e</sup>



Concentration en CO <sub>2</sub>	Concentration en CO <sub>2</sub> équivalent	Température moyenne mondiale	Année du maximum des émissions	Changement des émissions en 2050	Nombre de scénarios étudiés
ppm	ppm	°C	année	pour-cent	
350-400	445-490	2,0-2,4	2000-2015	-85 à -50	6
400-440	490-535	2,4-2,8	2000-2020	-60 à -30	18
440-485	535-590	2,8-3,2	2010-2030	-30 à +5	21
485-570	590-710	3,2-4,0	2020-2060	+10 à +60	118
570-660	710-85	4,0-4,9	2050-2080	+25 à +85	9
660-790	855-1130	4,9-6,1	2060-2090	+90 à +140	5
Total					177

colonne indique l'année au cours de laquelle la concentration en CO<sub>2</sub> devrait passer par un maximum, la 5<sup>e</sup> le changement des émissions en 2050 par rapport à celles de 2000 exprimé en valeur relative par rapport à ces dernières. La 6<sup>e</sup> colonne indique le nombre d'études prises en compte. Dans ces scénarios, la contre-réaction du climat sur la composition, récemment évaluée, n'est pas prise en compte, si bien que les réductions d'émission permettant de réaliser un niveau donné de stabilisation sont probablement sous-évaluées ■

## Colloques de l'Académie des sciences

### Écosystèmes et événements climatiques extrêmes

4-6 juillet 07

Les actes de ce Colloque seront publiés dans un numéro spécial des *Comptes Rendus Géoscience*. Programme en ligne sur le site de l'Académie : <http://www.academie-sciences.fr/conferences/colloques.htm>

### Transition Océan Continent

19-21 septembre 07 à l'Institut océanographique de Paris

Programme en ligne sur le site de l'Académie : <http://www.academie-sciences.fr/conferences/colloques.htm>

Renseignement : Fabienne Bonfils [fabienne.bonfils@academie-sciences.fr](mailto:fabienne.bonfils@academie-sciences.fr)

## Gel et dégel de la Terre boule de neige néo-protérozoïque : du terrain aux modèles climatiques. *Comptes Rendus Géoscience*, tome 339 (2007) N° 3-4, pp181-287

La « Terre boule de neige », Snowball Earth, un événement climatique extrême, suscite actuellement de vifs débats dans la communauté scientifique. De quoi s'agit-il ?

Il y a fort longtemps (environ un milliard d'années), à la fin du Précambrien, aurait eu lieu une glaciation à l'échelle du globe, dont on retrouve les témoins sous la forme de carbonates de fin de glaciation, très spécifiques, appelés « cap carbonates » ou « cap dolomies ». L'étude soigneuse de terrain, et l'analyse paléomagnétique, géologique et géochronologique de ces formations carbonatées et glaciogéniques – dont on a décrit des exemples norvégiens, omanais, nord-américains, brésiliens, namibiens, ouest-africains, australiens – suggèrent que les glaciers de basse altitude s'étendaient jusqu'à l'équateur et que la Terre, complètement englacée, aurait ressemblé, vue de l'espace, à une boule de neige. La modélisation apporte une aide à la compréhension des mécanismes susceptibles de donner lieu à une glaciation généralisée ou, au contraire, à l'entrée en déglaciation.

Dans l'état actuel de nos connaissances, la glaciation globale se serait produite à la suite de la dislocation du super-continent précambrien Rodinia, qui a provoqué un refroidissement de 8 °C, ce qui illustre le rôle critique de la distribution des continents. La consommation de CO<sub>2</sub> atmosphérique, facteur de refroidissement, aurait été optimisée, lorsque les continents se trouvaient dans la zone équatoriale et, surtout, s'il y avait altération des grandes provinces basaltiques, épanchées avant la fragmentation du super-continent. Il y aurait, par ailleurs, nécessité d'un effet de serre très élevé pour sortir d'une glaciation globale et neutraliser l'albédo terrestre, très élevé dans ce cas.

On peut donc en déduire que les climats extrêmes et l'effet de serre régnaient déjà à la fin du Précambrien, il y a un milliard d'années.





Par **Hervé Le Treut**

Membre de l'Académie des sciences,  
 directeur de recherche au CNRS,  
 professeur à l'École polytechnique,  
 directeur du Laboratoire de Météorologie  
 dynamique LMD/ENS

**A**u cours des dernières années, la perspective d'un changement climatique résultant des émissions de gaz à effet de serre s'est imposée comme un problème social et politique important, désormais discuté jusque dans les réunions du G8. Compte tenu des intérêts contradictoires qui sont désormais en jeu, il n'est pas étonnant que la validité du diagnostic scientifique qui sous-tend cette problématique soit remise en question de manière récurrente.

Le problème de l'expertise scientifique dans des domaines à forte implication sociale se pose toujours de manière complexe. Dans le cas du changement climatique, le GIEC, créé en 1988 sous la double tutelle du Programme Environnement des Nations unies et de l'Organisation météorologique mondiale, a reçu la mission de proposer une synthèse régulière des connaissances dans trois domaines qui définissent autant de « groupes » : les fondements scientifiques du problème, ses impacts régionaux (sur le milieu physique, les écosystèmes, les sociétés...) et les études socio-économiques permettant d'anticiper les évolutions futures des émissions de gaz à effet de serre, et d'estimer le coût de leur réduction. Le rapport récent du GIEC, réalisé en 2007, est le quatrième, après ceux de 1990, de 1995 et de 2001. Des rapports spéciaux ont été consacrés à des sujets plus spécifiques, par exemple le rôle de l'aviation.

# Changement climatique : le rôle du GIEC à l'interface entre sciences et société

La mission du GIEC est souvent mal comprise. Le GIEC assure un diagnostic périodique du travail de la communauté scientifique, mais ne conduit pas les recherches dans le domaine climatique. Son rôle n'est au contraire possible que parce qu'il existe par ailleurs une communauté scientifique nombreuse, vivante (c'est-à-dire traversée de débats multiples) et organisée. L'existence d'une recherche fondamentale forte, déjà bien structurée au plan international, bénéficiant du support de sociétés savantes, qui ont leurs journaux et leurs critères de publication, ou encore d'éléments de coordination internationale, tels que le Programme mondial de recherche climatique ou le Programme international géosphère-biosphère, constitue de fait une nécessité absolue pour qu'une entreprise telle que le GIEC soit possible – celui-ci, par exemple, s'appuie de manière exclusive sur des articles publiés dans des revues à comité de lecture. La désignation des rédacteurs suit aussi une double logique de reconnaissance scientifique et de proposition par les différents gouvernements. Le rapport est rédigé selon un protocole très strict qui est aussi destiné à garantir l'implication du plus grand nombre possible de scientifiques. Le texte initial est proposé à l'ensemble de la communauté scientifique, puis à des experts gouvernementaux et tous les commentaires ou critiques qui en résultent font l'objet d'une prise en compte ou d'une réponse explicite, rendue publique et vérifiée par des éditeurs. Cette phase de revue est essentielle car elle garantit qu'aucune source importante d'information (publiée) ne peut finalement être ignorée au cours des quatre itérations successives du texte. Le GIEC produit enfin des résumés, qui sont

écrits par des groupes restreints, et dont certains (les résumés pour décideurs) sont votés ligne par ligne en assemblée générale par des experts gouvernementaux. Cette phase est jugée troublante par beaucoup, en raison de son caractère politique et de ses difficultés de mise en œuvre. Les résumés ne doivent prendre en compte que des éléments identifiés du rapport complet, mais ils ont par essence une précision scientifique plus faible que le rapport complet. La notion même de vote sur un texte scientifique paraît étrange à beaucoup. L'objectif principal d'une telle démarche est d'identifier la part des éléments du dossier scientifique qui fait désormais l'objet d'un consensus et d'associer les représentants des gouvernements à leur rédaction. Mais à tout moment le document reste sous le contrôle de ses rédacteurs : ce n'est donc pas un document politique, mais un document scientifique investi d'un niveau de reconnaissance exceptionnel.

Puisque la notion de « communauté scientifique » joue un rôle essentiel dans le développement d'une activité d'expertise telle que celle du GIEC, il est bon de rappeler que la communauté qui s'est créée autour des sciences de l'environnement global de la planète n'est pas exclusivement focalisée sur le problème du changement climatique. En l'espace de quelques décennies elle a mis en place des systèmes d'observation et de modélisation complexes, qui sont aussi utilisés pour le diagnostic et la prévision dans des domaines nombreux et presque toujours vérifiables : prévision du temps, de l'état de la mer, des réserves en eau du sol, des occurrences de crues, de la qualité de l'air... Les fluctuations



interannuelles du climat, partout sur le globe, et plus particulièrement dans des régions critiques comme le Sahel, les régions de mousson, celles où se développe le phénomène El Niño, ont bénéficié de mesures et diagnostics nouveaux, qui ont transformé la manière dont nous les comprenons et abordons le problème de leur prévisibilité. Dans le même temps la reconstitution quantitative des évolutions climatiques passées a offert des perspectives nouvelles sur le rôle des composantes lentes du système climatique et leur modélisation. La compréhension nouvelle du rôle climatique de la chimie atmosphérique, de la biochimie continentale ou océanique a permis de progresser vers un diagnostic plus intégré du fonctionnement du « système Terre », qui s'étend aujourd'hui aux interactions avec les facteurs économiques. Ces recherches ont forgé une communauté scientifique large, internationale, organisée, clairement identifiée, sur laquelle s'est appuyé le processus du GIEC.

La force du message de la communauté scientifique tient aussi probablement à un autre facteur : sa simplicité conceptuelle et sa constance. Ceci est particulièrement vrai pour le groupe I consacré aux fondements physiques du problème. L'accumulation des gaz à effet de serre dans l'atmosphère est un fait avéré, qui s'est développé de manière particulièrement rapide après la Deuxième Guerre mondiale, et qui continuera inévitablement à croître tout au long des décennies à venir, si les émissions continuent d'être trop importantes. De même le lien entre gaz à effet de serre et chauffage relève d'une physique qui est très bien comprise. Les modèles climatiques qui ont été développés dès les années soixante pour représenter le climat de la Terre sous l'effet des lois de la physique ont permis très tôt de mettre en évidence un risque de réchauffement de la planète de plusieurs degrés – donc considérablement plus important que les fluctuations naturelles observées au cours des derniers millénaires. Dès le premier rapport du GIEC, en 1990, ce risque climatique faisait l'objet d'un diagnostic qui reste d'actualité : réchauffement plus fort aux hautes latitudes, augmentation des précipitations allant dans le sens d'une exagération des tendances actuelles, impact sur le relèvement du niveau de la mer. Les rapports successifs du GIEC sont venus confirmer ce diagnostic au travers des résultats de modèles beaucoup plus détaillés que ceux de la fin des années 1980 – après avoir envisagé et analysé toute une série de critiques sur la simplicité des premiers modèles. Ils y ont ajouté une compréhension très étoffée, même si encore insuffisante des risques associés : relèvement du niveau de la mer, modification des écosystèmes marins et continentaux, etc. Parallèlement le climat réel a commencé à évoluer dans une direction qui est celle qu'avaient préalablement dessinée les modèles. Ce changement observé suit donc *a posteriori* les anticipa-

tions faites antérieurement par les modèles de première génération. D'éventuels mécanismes amplificateurs (par exemple la baisse d'activité photosynthétique d'une partie de la végétation dans un climat plus chaud) ont aussi reçu un début de quantification. Ces changements ont des enjeux globaux très clairs, avec une problématique d'inégalités Nord-Sud éventuellement plus prononcées, ou encore l'idée d'une dette vis-à-vis de la génération suivante, associée aux très longues échelles de temps de la réponse climatique.

Malgré ces éléments le processus du GIEC a reçu des critiques qui méritent d'être examinées. Une grande part d'entre elles tiennent à la notion de consensus. Il est évident que la science progresse par une remise en question constante des connaissances tenues jusque-là pour acquises, et il en va de même dans les sciences de l'environnement. Il serait de ce point de vue extrêmement malsain que le GIEC ne soit plus un lieu de diagnostic, mais aussi le lieu où se décident les axes de recherche nouveaux. Il serait aussi extrêmement dangereux d'oublier à la fois la part d'incertitude, que comportent les scénarios d'évolution du climat, et la nécessité d'une recherche fondamentale qui reste active et soutenue. C'est dans la part incertaine des changements climatiques futurs, autour de mécanismes qui n'ont pas nécessairement déjà fait l'objet d'une exploration approfondie, et qu'il est donc aussi plus difficile de traduire de manière consensuelle, que se situent certains des risques majeurs pour nos sociétés, qui commandent aussi les décisions politiques les plus exigeantes. Le risque que le GIEC puisse empiéter sur la définition des axes de recherche réclame une certaine vigilance : une évolution récente a vu le GIEC devenir plus incitatif, et induire, presque malgré lui, des recherches nouvelles, plus finalisées. En proposant une série de scénarios « marqueurs » pour les émissions de gaz à effet de serre futurs, par exemple, le GIEC a ainsi très naturellement incité l'ensemble des centres de modélisation climatiques à réaliser des études numériques très lourdes des impacts associés, ce qui pèse fortement sur la vie des laboratoires.

Au total on peut dire que les conditions de leur élaboration apportent aux rapports du GIEC une valeur de référence qui induit un rôle croissant de levier politique. Un contresens important serait par contre d'en faire l'élément unique d'articulation des débats entre science et sociétés : au-delà de la nécessité de maintenir une recherche fondamentale active, soulignée plus haut, les problèmes du changement climatique ne peuvent être dissociés d'une série d'enjeux plus larges : énergie, biodiversité, santé, développement, pauvreté. Un cadre de réflexion plus vaste, citoyen, politique, est donc nécessaire, qui nourrira des débats qui cette fois, n'ont aucune raison de donner lieu à un consensus aussi fort ■

# L'océan et le changement climatique



## Importance du couple océan-atmosphère

**L**es échanges d'eau et d'énergie entre l'océan et l'atmosphère gouvernent en grande partie le climat de notre planète. Des perturbations dans l'atmosphère ont des répercussions sur l'océan et vice-versa. Chacun de ces compartiments a une dynamique et un temps de réaction propres. L'océan a notamment une inertie thermique plus grande du fait de son volume et de la chaleur massique de l'eau liquide.

Dès le XIX<sup>e</sup> siècle, Alexander von Humboldt avait cartographié les températures à la surface du globe et même, dans les zones montagneuses, en fonction de l'altitude. Son remarquable esprit de synthèse lui permit alors de distinguer les relations étroites entre les courants marins et les climats et de remarquer que les hautes latitudes de l'Atlantique Nord et de l'Europe, comme en Scandinavie, bénéficient d'un climat relativement clément lié à l'influence de l'océan Atlantique.

Le déficit de chaleur des hautes latitudes par rapport aux basses latitudes est compensé par des échanges de chaleur assurés par la mise en mouvement des enveloppes fluides de la Terre, c'est-à-dire l'océan et l'atmosphère. Dans le

Par **Édouard Bard**

Professeur au Collège de France, Chaire de l'évolution du climat et de l'océan, CEREGE, Europôle de l'Arbois, Aix-en-Provence



détail, ces échanges méridiens de chaleur sont complexes car ils dépendent de la latitude, de la longitude et des saisons. Un maximum de transport de chaleur, équivalent à 6 millions de gigawatts, a lieu aux moyennes latitudes des deux hémisphères. Par exemple vers 40 °N, le transport est réalisé de façon à peu près équivalente par trois mécanismes principaux : la circulation des masses d'air, les échanges de chaleur latente liés à l'évaporation de l'eau de l'océan suivie de sa condensation et enfin les courants marins. Cette composante océanique culmine à presque 2 millions de gigawatts vers 15° de latitude nord, l'Atlantique représentant prati-

quement les deux tiers du transport.

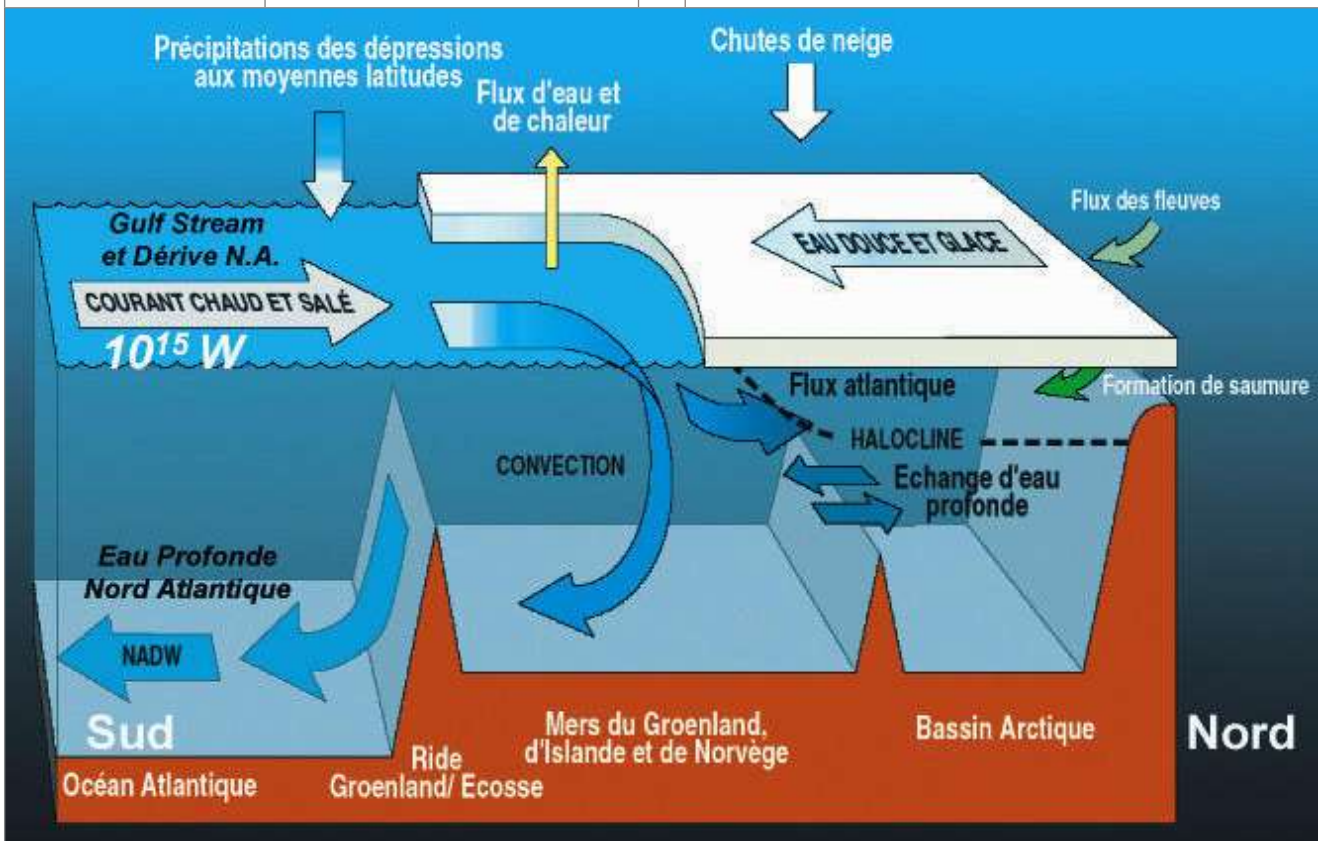
Ce rappel souligne l'importance de l'océan Atlantique

Figure 1 - Bloc-diagramme schématisant les processus conduisant à la formation d'Eau Profonde Nord Atlantique (modifié d'après Tomczak & Godfrey 1994).

face depuis les régions tropicales. Peu à peu, les différentes plongées d'eau profonde se mélangent et forment la masse d'Eau Profonde Nord Atlantique qui entraîne environ de 15 à 20 millions de mètres cubes par seconde. Cette masse d'eau fait partie d'une gigantesque boucle de convection, baptisée un peu abusivement circulation thermohaline mondiale et souvent représentée par un énorme "tapis roulant". Cette simplification exagérée est néanmoins utile pour se représenter les échanges d'eau profonde entre les différents bassins océaniques.

### Variabilité du couple océan-atmosphère

Ce sujet a pu être étudié théoriquement à l'aide d'une variété de modèles numériques. Il est maintenant reconnu que le couple océan-atmosphère présente plu-



dans les transports de chaleur à l'échelle planétaire. Globalement les eaux de surface, chaudes et salées, des régions tropicales de l'océan Atlantique sont transportées vers le Nord via les courants de surface, en particulier le Gulf Stream et la Dérive Nord Atlantique (figure 1). Pendant leur trajet en latitude, ces courants se refroidissent ce qui entraîne une densification des eaux de surface. Arrivées en mers du Groenland, d'Islande, de Norvège et du Labrador, les eaux de surface deviennent si denses qu'elles plongent dans les abysses, permettant la réoxygénation des couches profondes de l'océan Atlantique. Ce processus de convection est entretenu continuellement par le transport d'eau de sur-

sieurs régimes stables pour les mêmes conditions. La transition d'un régime à l'autre se produit rapidement quand certains paramètres climatiques atteignent des seuils critiques (points de bifurcation). Ce comportement non linéaire peut être illustré par une boucle d'hystérésis qui représente la température dans la région de l'Atlantique Nord et des continents adjacents (déterminée par le transport de chaleur) comme une fonction du flux d'eau douce vers l'Atlantique Nord venant principalement des pluies, des fleuves et de la fonte d'icebergs. La modélisation du couple océan-atmosphère n'en est encore qu'à ses débuts et la géométrie de cette boucle d'hystérésis est loin d'être connue. De

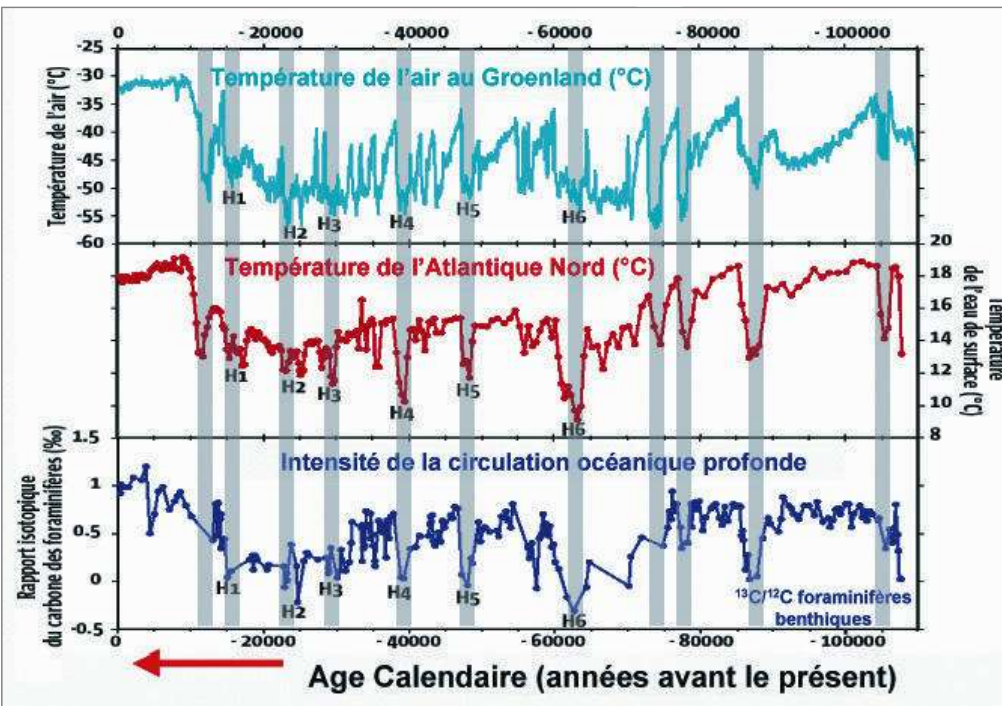


Figure 2- Séries temporelles climatiques et océanographiques des 110 000 dernières années pour la zone de l'Atlantique Nord. En bleu clair, la température de l'air au sommet du Groenland estimée à partir de la mesure des isotopes de l'oxygène de la glace du carottage GRIP (Dansgaard *et al.* 1993 *Nature*). En rouge, la température des eaux de surface en Atlantique Nord mesurée à l'aide d'un paléothermomètre moléculaire (alcénones). Cet enregistrement compile les résultats mesurés au CEREGE (Aix-en-Provence) dans deux carottes de sédiments marins (Bard *et al.* 2000 *Science*, Paillet & Bard 2002 *Paleo3*). En bleu foncé, l'intensité de la circulation profonde de l'océan Atlantique reconstituée à partir des isotopes du carbone mesurés dans les foraminifères benthiques prélevés dans une carotte de sédiments marins (Shackleton *et al.* 2 000 *Paleoceanography*).

plus, la position du climat actuel par rapport aux points de bifurcation n'est pas non plus déterminée. Les paléoclimatologues ont été les premiers à mettre en évidence des changements de régime climatique en étudiant les sédiments océaniques et les glaces polaires. Ces instabilités climatiques ont été particulièrement fréquentes pendant les périodes de glaciation. Les événements les plus spectaculaires étaient des périodes d'intense débâcle des calottes de glace qui occupaient les continents de l'hémisphère Nord. L'injection d'énormes quantités d'eau douce pendant ces débâcles a diminué la densité de l'eau de mer, freinant ainsi considérablement la formation d'eau profonde. Ces fréquentes débâcles d'icebergs se sont conjuguées à d'autres modifications du cycle de l'eau, pour générer des fluctuations climatiques extrêmement brusques et de grande ampleur.

Comme le montre la figure 2 focalisée sur les 100 derniers millénaires, les fluctuations de température au Groenland et en Atlantique Nord sont intimement liées aux variations d'intensité de la circulation profonde de l'Atlantique. Sur les continents, la végétation a été profondément marquée par ces changements de régime climatique. Au sud de l'Europe, la végétation oscillait entre des paysages forestiers et des steppes froides et sèches. Les variations thermiques les plus grandes sont observées dans la région de l'Atlantique Nord, mais les recherches récentes indiquent aussi une influence à l'échelle planétaire. En particulier, l'intensité de la mousson asiatique est corrélée positivement avec les températures de la zone Atlantique et la circulation profonde. D'autres données similaires obtenues en Amérique du Sud montrent que les brusques variations de l'Atlantique Nord s'accompagnaient de larges migrations

en latitude de la zone intertropicale de convergence (« équateur atmosphérique » séparant les systèmes d'alizés des deux hémisphères).

### L'océan est-il en train de changer ?

Les séries paléoclimatiques montrent que l'océan est relativement stable durant les périodes chaudes interglaciaires, comme celle que nous connaissons depuis une dizaine de millénaires. Néanmoins, cet équilibre naturel pourrait être perturbé par le changement climatique actuel et ses nombreuses conséquences sur l'atmosphère et l'océan. Comme le suggèrent les modèles, il est théoriquement possible qu'une perturbation de la circulation de l'Atlantique ait même déjà commencé à la suite du réchauffement du siècle dernier. Bien que le recul soit encore très insuffisant pour en être certain, il est donc instructif de considérer l'évolution récente de certains paramètres océanographiques.

Les enregistrements hydrographiques des cinquante dernières années montrent qu'un réchauffement moyen de 0,1 °C s'est propagé des eaux de surface jusqu'à un kilomètre de profondeur, voire beaucoup plus dans les zones de convection profonde. La conséquence directe est que l'océan stocke environ 85 % de la chaleur excédentaire liée au réchauffement actuel (correspondant à  $14,5 \cdot 10^{22}$  joules pour la période 1955-1998). C'est d'ailleurs le phénomène de dilatation thermique de l'océan qui est responsable d'environ la moitié de l'élévation du niveau marin mondial au cours de la dernière décennie comme l'ont mesuré les altimètres embarqués sur les satellites. Les données des satellites indiquent aussi une diminution nette de la banquise de la zone arctique au cours des trente dernières années. La couverture de glace estivale diminue environ de 7 % par décenn-



nie. Ces observations spatiales sont corroborées par une diminution importante de l'épaisseur de la banquise arctique mesurée par les sous-marins.

Les océanographes ont étudié en détail l'évolution de la salinité des océans au cours des cinq dernières décennies (figure 3). La compilation des mesures montre clairement des diminutions de la salinité dans l'océan Pacifique et l'Atlantique Nord. Ces diminutions aux hautes et moyennes latitudes s'accompagnent d'une augmentation de la salinité de la zone intertropicale. Cette évolution est le signe d'un déséquilibre du cycle hydrolo-

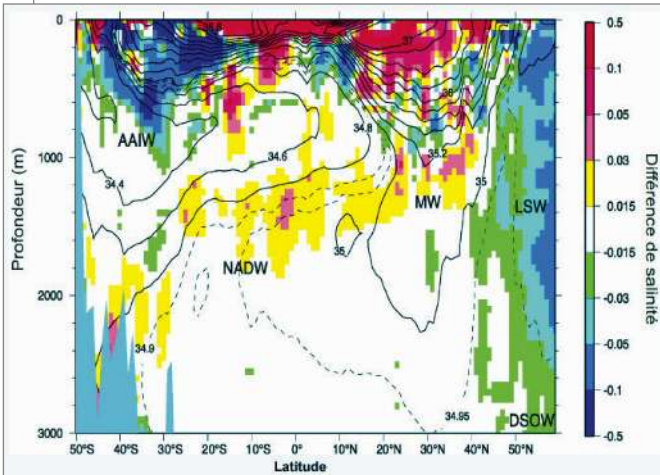


Figure 3- Section méridienne de l'océan Atlantique résumant l'évolution de la salinité au cours des dernières décennies (contraste en psu entre les périodes 1999-1985 et 1969-1955, modifié de IPCC 2007 d'après Curry et al. 2003 *Nature*). NADW (North Atlantic Deep Water) : Eau profonde Nord Atlantique, LSW (Labrador Sea Water) : Eau de la mer du Labrador, DSO (Denmark Strait Overflow Water) : Eau déversante du Détroit du Danemark, AAIW (Antarctic Intermediate Water) : Eau Antarctique intermédiaire, MW (Mediterranean Water) : Eau Méditerranéenne.

gique avec une évaporation accrue de la zone intertropicale et des précipitations plus importantes aux latitudes élevées, ainsi qu'une intensification des échanges d'eau entre l'Atlantique et le Pacifique.

Avec l'aide des courantomètres et des satellites, les océanographes ont aussi mis en évidence certaines fluctuations récentes des courants de surface de l'Atlantique Nord, notamment pour le courant du Labrador. La vitesse instantanée de la circulation profonde est inaccessible aux satellites et est généralement trop faible pour être mesurée directement par courantométrie. En effet, les énormes flux de plusieurs millions de mètres cubes par seconde sont répartis sur une tranche d'eau importante ce qui diminue fortement leur vitesse instantanée. Néanmoins, dans certains cas favorables, la circulation profonde est canalisée par la topographie du fond de l'océan, en particulier au niveau de certains détroits profonds ou failles majeures qui découpent la dorsale médio-atlantique. Plusieurs équipes d'océanographes mesurent directement les variations de flux de certaines masses d'eau qui alimentent, plus en aval, l'Eau Profonde Nord Atlantique. Par ailleurs, la comparaison des données hydrographiques à la latitude 25 °N

permet aussi d'estimer la variation du flux d'Eau Profonde Nord Atlantique au cours des cinquante dernières années.

Ces différentes études récentes indiquent des variations significatives à l'échelle interannuelle et décennale. Néanmoins, il est encore difficile de discerner une éventuelle tendance à long terme. Les fluctuations observées pourraient aussi être liées à une variabilité naturelle encore peu comprise et mal quantifiée à cause du faible recul procuré par les observations.

En considérant les zones les plus sensibles, ces différentes études océanographiques s'attachent à détecter un éventuel changement de la circulation océanique. À elles seules, elles ne permettent pas d'estimer directement une éventuelle variation de la circulation méridienne mondiale, qui permettrait de calculer les flux de chaleur recherchés par les climatologues. Les calculs de flux de chaleur globaux ne détectent d'ailleurs pas de tendance significative sur plusieurs décennies. Néanmoins, cette méthode globale conduit à des incertitudes importantes sur le flux de la circulation méridienne Atlantique et il n'est donc pas exclu qu'un changement relativement limité ait déjà eu lieu.

### Vers une perturbation de la circulation océanique ?

À cause de l'augmentation de la teneur en gaz à effet de serre, le réchauffement planétaire devrait se poursuivre pendant les prochaines décennies ce qui aura des répercussions importantes sur le cycle de l'eau. En toute logique, celui-ci devrait globalement s'intensifier et s'accompagner d'une augmentation, aux hautes latitudes, des précipitations et des flux d'eau douce via les fleuves et la fonte des glaces continentales, en particulier du Groenland. Ces changements conjugués de la température et du cycle de l'eau sont donc de nature à diminuer la densité des masses d'eau de l'Atlantique Nord. Une telle chute pourrait donc déstabiliser une ou plusieurs zones de plongée d'eau profonde.

La plupart des modèles climatiques perturbés par les gaz à effet de serre répondent par une diminution progressive de l'intensité de la circulation profonde. Cependant, il n'y a pas de consensus sur l'amplitude de cette diminution qui varie de 10 à 50 % après un siècle. Il n'est pas exclu qu'à partir d'un certain seuil, la circulation bascule dans un autre état stable où elle serait encore plus affaiblie. D'après les modèles, on n'atteindrait pas ce seuil avant plusieurs siècles. Mais tout dépend de l'intensité de la perturbation anthropique et du degré de réalisme du modèle.

À l'échelle du siècle, si l'on ne passe pas ce seuil, le seul effet sera un réchauffement moindre dans la région du Nord de l'Atlantique. Mais si l'on atteint un point de bifurcation, alors on pourrait assister, dans une Terre globalement plus chaude, à un refroidissement localisé sur l'Atlantique Nord. Un débat animé se poursuit dans

la communauté des modélisateurs au sujet de la possibilité d'une telle instabilité dans un futur de l'ordre de un à quelques siècles. Les difficultés liées à la non-linéarité de la réponse du système climatique et à sa sensibilité aux faibles fluctuations font qu'il est très difficile d'estimer la probabilité pour qu'un tel événement climatique ait lieu avant la fin du XXI<sup>e</sup> siècle. Ceci d'autant plus que cette probabilité dépend des émissions futures des gaz à effet de serre et des autres perturbations anthropiques. Certains modélisateurs ont même essayé de calculer cette probabilité en fonction de l'ampleur du réchauffement climatique moyen à l'année 2100. Si le réchauffement se limitait à 2 °C, la perturbation hydrologique serait assez limitée et la probabilité de basculement resterait très faible, environ quelques pour-cent. Par contre, si le réchauffement mondial atteignait 8 °C, la probabilité grimperait à une chance sur trois.

### Des effets complexes sur la chimie de l'océan et les écosystèmes

L'augmentation de la teneur atmosphérique en gaz carbonique s'accompagne d'une dissolution partielle de ce gaz dans les eaux de surface. L'océan constitue donc un énorme puits qui pompe environ le tiers du gaz carbonique émis par les activités humaines (plus de 120 milliards de tonnes de carbone depuis le début de la période industrielle, voir la figure 4). En solution, le gaz carbonique se combine à l'eau pour former un diacide faible, l'acide carbonique. On estime que, depuis un

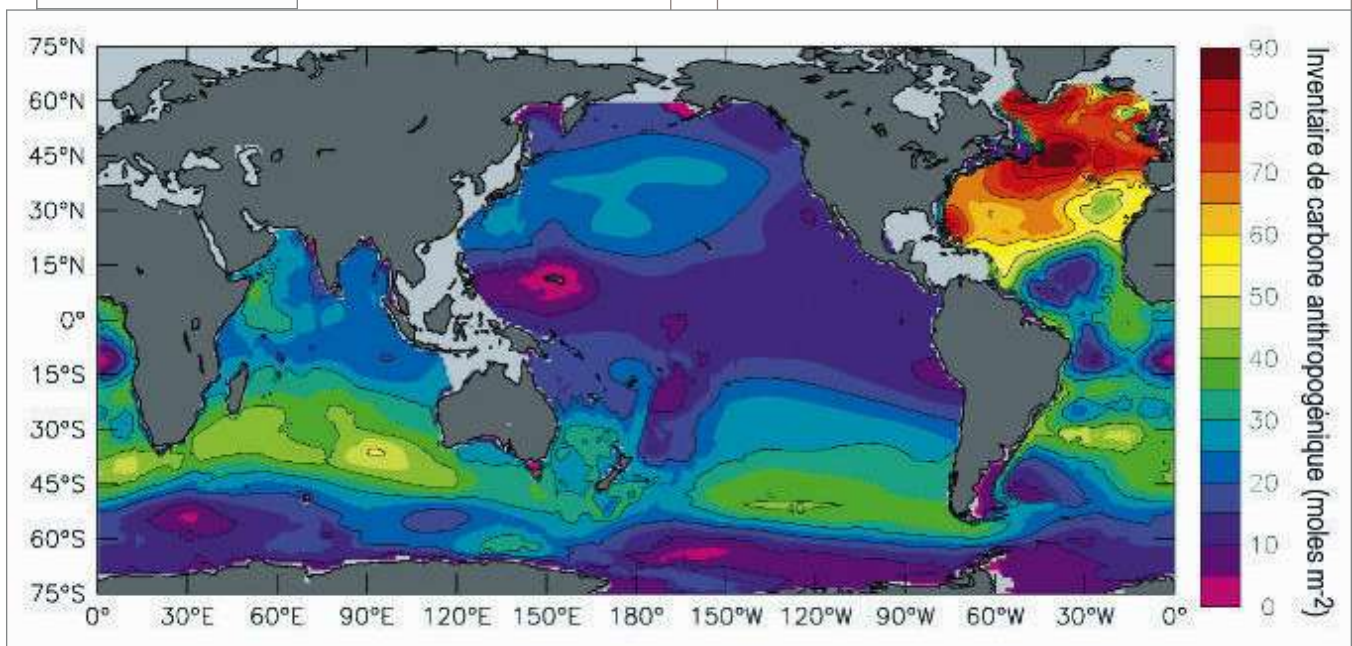
siècle, l'acidité des eaux de surface a augmenté, ce qui se traduit par une diminution d'environ 0,1 unité pH. Des mesures directes de la chimie des eaux de surface ont été réalisées pour quel-

ques stations océanographiques, indiquant une diminution progressive d'environ 0,02 unité pH par décennie. Les variations hydrologiques mentionnées plus haut s'accompagnent aussi d'une diminution généralisée du brassage des eaux de la thermocline (de 100 à 1000 m de profondeur environ). Cette baisse de la ventilation se traduit par une chute de la teneur en oxygène dissous dans ces masses d'eau.

La capacité de pompage du CO<sub>2</sub> anthropique par l'océan devrait malheureusement diminuer dans le futur. En effet, la solubilité du CO<sub>2</sub> chute lorsque les eaux de surface se réchauffent et deviennent plus acides. De plus, les baisses de la ventilation de la thermocline et de la formation d'eau profonde pourraient encore diminuer cette capacité de stockage du CO<sub>2</sub> dans l'océan.

Les modifications en cours de l'océan auront des répercussions sur les écosystèmes les plus fragiles, comme les récifs coralliens. Comme on peut déjà l'observer actuellement, l'augmentation de la température peut entraîner la mort des coraux. Il s'agit du phénomène de blanchissement qui correspond à la rupture de la symbiose entre les organismes animaux du corail et les algues microscopiques qu'ils renferment. Cet effet de mort thermique devrait donc se renforcer dans le futur. Malheureusement pour ce magnifique écosystème, les coraux devraient aussi subir l'effet direct de l'acide carbonique dissous dans les eaux de surface. L'acidification de l'eau de mer contribuera à freiner la formation du squelette des coraux constitué de carbonate de calcium. D'autres organismes font l'objet de la même inquiétude, comme le phytoplancton calcaire des hautes latitudes de l'océan mondial. Au-delà de ces changements liés à la chimie de l'eau de mer, les organismes marins, du phytoplancton aux poissons, seront probablement perturbés directement par le réchauffement planétaire qui devrait continuer à se propager dans l'océan ■

Figure 4- Carte de l'océan inventariant le stockage de carbone anthropique (moles par m<sup>2</sup>) estimé depuis le début de la période industrielle jusqu'à l'année 1994 (modifié de IPCC 2007 d'après Sabine et al. *Science*, 2004).





# Le point de vue du GIEC

Entretien de **Susan Solomon**<sup>1</sup> avec **Paul Caro**<sup>2</sup>

1. Associé étranger de l'Académie des sciences, co-présidente du groupe de travail 1 du GIEC, chercheur au laboratoire de recherche sur le système Terre de la NOAA à Boulder, Colorado, États-Unis
2. Correspondant de l'Académie des sciences, directeur de recherche honoraire au CNRS



**Q**uel était l'intérêt de demander à des spécialistes de travailler collectivement sur les problèmes climatiques dans le cadre du GIEC (Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat) ?

Le GIEC a un rôle unique parce qu'il a mis en place un processus rigoureux à travers lequel les scientifiques, ensemble, évaluent ce que nous savons, et ce que nous ne savons pas, à propos du changement climatique. Un groupe d'auteurs examine le contenu de la littérature scientifique, et le rapport produit est critiqué par des centaines d'experts dans le monde, puis par les gouvernements mondiaux. Le groupe reçoit plusieurs milliers de commentaires, chacun d'entre eux est soigneusement considéré et les auteurs doivent fournir des réponses et évaluer les commentaires et les opinions échangées. Ceci donne un produit final assez différent de ce qu'il serait s'il ne dépendait que d'un seul expert donnant son opinion. C'est pourquoi les rapports du GIEC font autorité, il n'y a vraiment rien de comparable.

*Quelle est la situation au GIEC après la série de réunions du début 2007 ?*

Les rapports des groupes de travail 1, 2 et 3 ont été approuvés. Ceci signifie que les plus récents résultats sont disponibles pour les sciences

physiques, pour les conséquences et l'adaptation aux changements climatiques, et pour les choix et options de stratégie. Un rapport général est en cours de préparation qui fournira un résumé et une synthèse de l'ensemble des trois rapports. Il sera disponible en novembre 2007.

*Les conclusions et les recommandations du GIEC sont-elles acceptées à la fois par les scientifiques et par les dirigeants politiques ?*

Je pense que les rapports sont largement bien reçus par la communauté scientifique comme par les décideurs politiques. L'industrie s'est montrée aussi très intéressée et généralement sensible aux résultats.

*Est-ce que tout le monde convient que le réchauffement attendu est dû essentiellement à la combustion du carbone fossile ?*

Je pense qu'il est honnête de dire qu'il y a un fort consensus sur le fait que le réchauffement global est réel et est dû d'abord à la combustion des carburants fossiles. Cela ne veut pas dire que tout le monde sur la Terre en est d'accord, mais il y a aussi des gens sur la Terre qui ne sont pas d'accord sur le fait que fumer cause le cancer du poumon. Dans une société libre, il y aura toujours quelques points de vue différents, mais il est important de considérer leur origine, le niveau où ces points de vue ont été testés et examinés par d'autres, le degré d'évidence. Je pense que l'évidence est très forte que le réchauffement des 50 dernières années est dû principalement à la combustion des carburants fossiles. D'autres facteurs comme le méthane produit par l'agriculture y contribuent également.

*Que pensez-vous des autres hypothèses sur les causes des changements climatiques, comme l'activité du Soleil ou les volcans ?*

Les volcans dispersent un peu de particules d'aérosols dans l'atmosphère qui réfléchissent l'énergie vers l'espace et produisent des refroidissements provisoires et cela a été effectivement observé après l'éruption du Mont Pinatubo en 1991. Ils ne contribuent pas au réchauffement d'une manière significative. L'activité du Soleil ne s'est pas accrue durant la période pour laquelle nous avons des mesures calibrées de haute qualité pour sa brillance et pour les rayons cosmiques. Donc, le fort réchauffement récent n'est pas explicable par l'idée que le Soleil devient plus actif.

*Dans quelle mesure faites-vous confiance aux prédictions des modèles climatiques pour le futur ?*

Les modèles climatiques peuvent faire certaines choses très bien et d'autres moins bien. L'évidence est forte qu'un doublement de la teneur en dioxyde de carbone conduira à un réchauffement planétaire moyen qui vraisemblablement sera compris entre 2 °C et 4,5 °C, sans doute 3 °C. Il est aussi assez clair que les continents se réchaufferont plus que les océans, ce qui a déjà commencé, donc c'est un résultat robuste. Nous sommes moins certains du devenir d'autres variables comme les pluies bien qu'il y ait certaines zones comme la Méditerranée qui probablement vont souffrir de la sécheresse avec le réchauffement global. Pour l'Arctique nous pouvons être certains qu'un fort réchauffement se produira

et que la glace de mer va continuer à disparaître. Nous sommes moins sûrs pour l'Antarctique. Il y a des différences locales dans le degré de certitude et d'incertitude entre différentes variables et différentes régions. Mais que tout sera plus chaud avec l'augmentation de la teneur en gaz à effet de serre est un résultat robuste. Que certaines régions seront plus chaudes que d'autres est aussi un résultat robuste.

*Êtes-vous optimiste ?*

Je pense qu'il est clair que la compréhension par le public du changement climatique a énormément avancé ces dernières années, et cela me rend optimiste. Mon principal souci est qu'une information scientifique de qualité soit disponible, et claire, et je pense que cela marche bien ■

***Je pense qu'il est honnête de dire qu'il y a un fort consensus sur le fait que le réchauffement global est réel et est dû d'abord à la combustion des carburants fossiles.***

### **Déclaration commune des Académies des sciences pour le sommet du G8 « Croissance et responsabilité : pérennité et efficacité de l'énergie et protection du climat »**

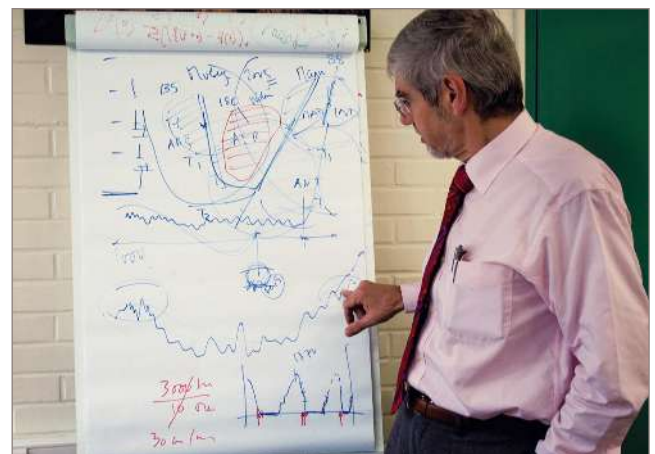
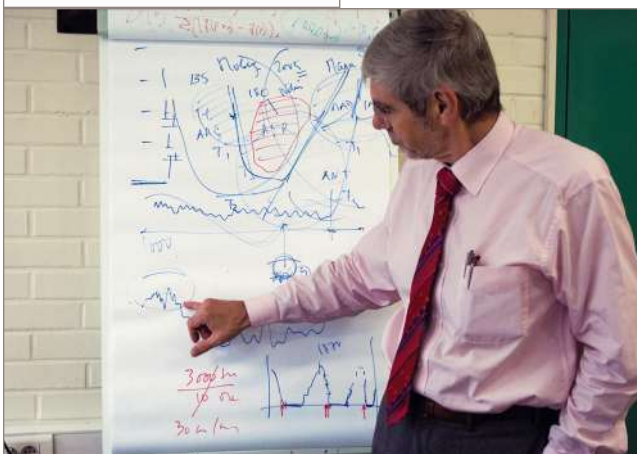
Quatorze Académies des sciences ont produit une déclaration unanime destinée à alerter le monde politique et économique de façon à inciter "toutes les nations du monde à coopérer afin d'identifier les objectifs stratégiques communs nécessaires à des systèmes d'énergie durables, efficaces et tolérables pour le climat et les mettre en œuvre"

Le texte de cette déclaration se trouve sur le site de l'Académie : <http://www.academie-sciences.fr>





Comment interpréter les fluctuations de la température, à court, moyen et long terme?



# Quelques éléments de débat scientifique dans la question du changement climatique

Entretien de **Vincent Courtillot**<sup>1</sup>  
avec **Paul Caro**<sup>2</sup>

1. Membre de l'Académie des sciences, professeur à l'université Denis-Diderot, directeur de l'Institut de physique du globe de Paris
2. Correspondant de l'Académie des sciences, directeur de recherche honoraire au CNRS

**P**ourquoi l'Académie des sciences a-t-elle organisé les 5 et 13 mars 2007 des réunions consacrées au changement climatique dans le sillage de la présentation des résultats du GIEC le 6 février 2007 ?

L'idée d'une réunion à l'Académie sur le thème du changement climatique s'est imposée à la suite d'échanges lors d'une conférence en janvier 2006. Jean Dercourt a demandé à Bernard Tissot et à moi-même, de l'organiser. Pour des raisons pratiques, le choix s'est fixé sur mars 2007. Il se trouve que, quelques semaines auparavant, notre consœur Susan Solomon était venue exposer devant l'Académie les conclusions du rapport du premier groupe de travail du GIEC. Nous avons choisi une suite de deux séances, l'une purement scientifique et l'autre ouverte au grand public. L'ensemble a formé une séquence intéressante, bien que non planifiée à l'avance.

Pour la première journée, des chercheurs de points de vue assez différents étaient invités. Il s'agissait de favoriser le débat durant une journée entière, en prenant tout notre temps. Cela a été au-delà de nos prévisions et les horaires des exposés ont un peu dérapé, de sorte que le débat a sans doute été trop court. La seconde journée était d'une nature différente, puisqu'il s'agissait, au cours d'une séance publique « ordinaire »

de l'Académie, de présenter un résumé de ce qui s'était dit pendant la journée précédente et donc d'échanger les arguments devant l'ensemble des académiciens et le public présent (en plus d'une intervention d'Édouard Bard qui n'avait pu se libérer pour la première journée). La plupart de ces communications feront l'objet d'un numéro spécial des *Comptes Rendus* de l'Académie.

*Le cœur du débat n'est-il pas de savoir 1) s'il y a réchauffement climatique et 2) quelle est la part du CO<sub>2</sub> dans le phénomène ?*

En effet. Et il faut essayer de bien distinguer ces deux questions et de tenter d'y répondre séparément. Une partie des désaccords possibles vient justement du fait que l'on ne les sépare pas suffisamment. Pour ce qui est du réchauffement climatique global, accepté chacun le sait comme une vérité bien établie par le plus grand nombre actuellement, nous sommes quelques uns à découvrir avec étonnement (et peut être naïveté, certains le penseront à coup sûr) que les données d'observation des stations météorologiques ne sont pas si simples à traiter et à comprendre. En revanche, pour ce qui est du gaz carbonique, l'augmentation de sa concentration depuis 150 ans dans l'atmosphère est indubitable : elle est liée à l'exploitation par l'homme des réserves de carbone fossiles.

**Les données d'observation des stations météorologiques ne sont pas si simples à traiter et à comprendre. En revanche, l'augmentation de la concentration du gaz carbonique depuis 150 ans dans l'atmosphère est indubitable.**



Le compte-rendu des travaux du GIEC, dans sa partie rédigée pour les décideurs politiques, se conclut par une phrase qui dit en gros qu'en 5 ans (entre le précédent rapport et celui-ci) les scientifiques qui ont préparé le rapport considèrent que la probabilité que le réchauffement climatique soit dû à l'élévation de la teneur de l'atmosphère en gaz carbonique d'origine anthropique est passée de 60 à 90 %. Cette conclusion pose la question de ce que signifie un consensus et de ce que peuvent en déduire les gens qui lisent le rapport. Est-ce une estimation quantitative (une incertitude au sens scientifique du terme) ou est-ce plutôt le vote de scientifiques, fondé sur leur opinion du moment ? Il est très important de ne pas confondre les deux.

#### *Une remarque liminaire*

Avant de tenter de répondre aux deux questions, je voudrais évoquer une remarque liminaire que j'ai faite à l'introduction du débat de la seconde journée. Ce n'est naturellement que mon interprétation, et elle n'est sans doute pas partagée par tout le monde, des différentes étapes par lesquelles

doit passer la démarche scientifique dans nos domaines des sciences de la Nature. La première chose par laquelle on commence, c'est l'observation. C'est pour cela que je souhaitais, et nous l'avons fait dans une certaine mesure au cours de ces journées, que l'on discute d'abord et surtout les observations : leur qualité, leur multiplicité et la confiance qu'on peut leur accorder. Ensuite vient la modélisation, la tentative de comprendre les phénomènes physiques et chimiques responsables des observations. Enfin, mais seulement en bout de chaîne vient, à notre ère des ordinateurs, la modélisation numérique. La démarche doit respecter cette progression : d'abord les observations, puis les mécanismes, ensuite la mise en équations, enfin la tentative de reproduire les observations avec un ordinateur. Or je suis frappé par l'impression, dans le domaine du réchauffement global, que le nombre de groupes qui par le monde se préoccupent d'acquiescer et de traiter de manière critique les observations, principalement de température, est très inférieur à celui de ceux qui travaillent sur la modélisation numérique. En France, plusieurs groupes construisent des modèles numériques. Notre confrère Hervé Le Treut était le représentant d'un des principaux groupes responsables de la mise au point de l'un de ces modèles, celui du laboratoire de météorologie dynamique. Il y a moins d'équipes qui s'occupent (à travers le Monde ou en France) des processus physico-chimiques, pour déterminer les rôles respectifs que jouent le gaz carbonique, les rayons cosmiques, la physique des nuages, les poussières, les éruptions vol-

***La démarche doit respecter cette progression : d'abord les observations, puis les mécanismes, ensuite la mise en équations, enfin la tentative de reproduire les observations avec un ordinateur.***

caniques, le Soleil. Il y a encore moins de gens (et c'est une chose qui nous a beaucoup surpris dans notre communauté de géophysiciens spécialisés dans l'étude de la Terre solide) qui contribuent à l'élaboration des observations, notamment de température. Une excellente équipe, dont notre consœur Anny Cazenave est l'animatrice, se préoccupe des évolutions du niveau de la mer, beaucoup moins sujettes à discussion. La donnée de base, que tout le monde connaît, c'est la fameuse courbe « en crosse de hockey » qui est censée illustrer l'évolution depuis 150 ans de la température moyenne du globe. En fait, définir la température moyenne de la basse atmosphère du globe est une question très difficile et il y a très peu de laboratoires dans le monde qui s'y intéressent ! La principale équipe est en Grande-Bretagne et son leader, le professeur Phil Jones, était présent à notre réunion du 5 mars. S'il y a des stations météorologiques dans le monde entier qui mettent en commun des bases de données, il nous semble qu'en fait assez peu de gens regardent ces observations de manière critique. Avec mon collègue Jean-Louis Le Mouél, qui est à l'origine de ces réflexions, et des collègues russes, Elena Blanter et

Mikhaïl Schnirman, nous avons regardé ces données d'observations de température et je dois dire qu'à notre grand étonnement nous avons découvert des signaux bien différents de ceux que l'on nous avait appris. C'est ainsi que des équipes de grande qualité font de la modélisation physique et chimique, des équipes encore plus nombreuses font de l'excellente modélisation numérique, mais en s'appuyant sur des données qu'ils n'ont pas acquiescées et critiquées eux-mêmes et qui ne sont produites que par un tout petit nombre d'équipes. Je suis très étonné qu'il n'y ait pas depuis 20 ans, 20 équipes dans le monde qui soient en train de vérifier l'une l'autre la validité de leurs données. Notre contribution pour l'instant, depuis quelques mois, et cela va être notre objectif dans les années qui viennent, est essentiellement de regarder les données. Nous souhaitons simplement être sûrs que la précision et la signification des données n'ont pas été surévaluées.

*Quelle est la légitimité de votre laboratoire à entreprendre ce type de recherches ?*

En géophysique, nous sommes entraînés très tôt à regarder les longues séries de données et habitués à « traiter le signal ». Beaucoup de gens ont oublié combien de techniques mathématiques de traitement du signal ont été découvertes par des géophysiciens (ce n'est parfois que quelques années après que les mathématiciens se les sont appropriées, en ont fait la théorie et les ont ensuite diffusées). Il en va ainsi de la transformée de Fourier

rapide, due à deux géophysiciens qui regardaient des données sismiques, et de la transformée en ondelettes, due à un géophysicien de la Compagnie générale de géophysique, notre collègue Morellet (dont notre confrère mathématicien Yves Meyer a fait la théorie). La méthode de transformée spectrale à entropie maximum a été développée dans les années 1970 par John Burg, un autre géophysicien spécialiste du traitement des données sismiques. Les géophysiciens ont donc l'habitude et les outils qui leur permettent de regarder avec soin de très longues séries de données temporelles, très denses, dans lesquelles on est souvent face à la grande difficulté de devoir analyser en même temps les très hautes fréquences et les très longues périodes, sans perdre de précision. Jean-Louis Le Mouél et moi-même avons depuis des décennies l'habitude d'analyser des séries longues d'observations magnétiques. Nos collègues russes nous ont apporté des méthodes nouvelles d'analyse non linéaire des signaux. Nous les appliquons maintenant à des séries d'observations de température et de pression. Ce n'est pas vraiment « sorcier » ni pour nous inhabituel, mais nous y faisons depuis quelques mois, pensons-nous, de « petites découvertes » déconcertantes et dont nous croyons qu'elles n'avaient pas été faites auparavant. Enfin, pour cette question de légitimité, je rappellerai combien un regard nouveau, à la frontière entre deux champs disciplinaires, apporte souvent à la recherche scientifique.

#### *La question du réchauffement climatique*

Mais revenons à la question du réchauffement. Que valent et que disent les observations qui sont dans le rapport du GIEC ? Ce sont essentiellement celles du Hadley Research Centre en Grande-Bretagne, compilées depuis des décennies par le professeur Jones et ses collègues. La température moyenne de la basse atmosphère est construite en moyennant des valeurs de la température, elles-mêmes moyennées dans des carrés de 500 km de côté sur une durée d'un mois. Ces données remontent à 1850. Les courbes publiées dans le rapport du GIEC montrent une augmentation de la température au cours des 20 dernières années et des fluctuations qui remontent jusqu'aux années 1850. À nos yeux, une grande question est de savoir ce que signifie cette courbe globale et si les incertitudes sur ces valeurs ont été bien estimées ou non. Je suis en discussion depuis nos journées avec le professeur Jones, un échange amical et régulier pour essayer de voir si nous pouvons reprendre et comparer nos données aux leurs. Pour l'instant cela semble difficile, ce laboratoire ayant

signé un accord de confidentialité avec les fournisseurs de données brutes ! Reconstituer cette base de données avec un accès aux données de l'ensemble des stations météorologiques du monde est un travail considérable, puisque le professeur Jones a dans sa base de données 3,7 millions de températures mensuelles depuis 1850. Or nous avons des doutes croissants sur la validité d'un calcul que pour l'instant nous n'avons pas tous les éléments pour reprendre.

***Pour l'Europe,  
« Oui, il y a un  
réchauffement  
climatique, il s'est  
produit après une  
période sans  
augmentation  
de température  
de quelques 80 ans,  
il s'est produit en  
quelques années,  
ce n'est donc pas  
un phénomène lent »  
Depuis 20 ans,  
la valeur de la  
température est  
de nouveau  
constante...***

Alors, qu'avons-nous fait ? Nous avons d'abord compilé les observations de 48 stations météorologiques couvrant l'Europe entière, de la Grande-Bretagne à l'Oural. Non pas des données moyennées tous les mois, parce que nous pensons qu'en utilisant des moyennes mensuelles on perd une partie essentielle de l'information, mais des données journalières. Dans ces données journalières, nous avons remarqué que d'une station à l'autre les corrélations étaient remarquables, que sur toute l'Europe les fluctuations de période d'un à dix ans sont les mêmes. Lorsqu'on calcule la valeur moyenne de toutes ces observations, on ne voit pas la moindre tendance à l'augmentation de 1900 à 1980 : la courbe est parfaitement plate, et ce sur toute l'Europe. On observe en revanche une année exception-

nellement froide en 1940 et un saut important (environ un demi-degré) et rapide en 1985-1987, dont nous n'avons pour l'instant pas compris l'origine. Et depuis ce saut, depuis 20 ans, la tendance est à nouveau plate.

La réponse, si nous parlons à des Européens, est de dire « Oui, il y a un réchauffement climatique, mais il n'a pas du tout la forme que vous croyez : il s'est produit après une période sans augmentation de température de quelques 80 ans, il s'est produit en quelques années, ce n'est donc pas un phénomène lent ». Qu'est-ce qui peut produire un phénomène aussi rapide ? Depuis 20 ans, la valeur de la température est de nouveau constante et cela explique bien le fait qu'au cours de ces vingt dernières années, les records de température de ces 100 dernières années aient fréquemment été battus, tout simplement parce qu'autour d'une température très largement fluctuante on a une valeur moyenne qui a « sauté ». Mais depuis 1980, il n'y a aucune tendance à l'accélération, ni à l'augmentation de la fréquence de ces records. Depuis, nous avons repris le même exercice sur quelques autres zones de la planète, principalement aux États-Unis. Les données sont remarquablement organisées dans des zones de quelques milliers de kilomètres de dimensions latérales. Les variations de « haute fréquence » (2 à 15 ans) ressemblent beaucoup à des fluctuations qui pourraient être excitées par le Soleil, mais



sont peut-être aussi une réponse naturelle du système climatique. L'observation majeure est que la variation à long terme change énormément d'une région climatique à l'autre. En Californie, la température n'a pas cessé de croître en accélérant : on observe donc là une courbe qui ressemble furieusement à la courbe d'accroissement du gaz carbonique, la fameuse courbe exponentielle. En revanche, toute la partie centrale des États-Unis connaît entre 1935 et 1975, 40 années d'une chute de température tout à fait considérable, alors que le gaz carbonique augmentait (mais que le soleil diminuait en activité). Et dans plusieurs provinces des États-Unis, la température actuelle est plus faible que dans les années 30. Donc, ce traitement des données fait apparaître des observations très intéressantes. Les questions que nous nous posons aujourd'hui, avec des données qu'il faudrait étendre au monde entier (et nous avons vu l'ampleur de la tâche), sont : « Que signifie donc la courbe mondiale des températures ? Est-ce que sa barre d'erreur n'est pas sous-estimée ? » Oui, en de nombreux endroits il y a un réchauffement récent, mais pas en Europe sur les vingt dernières années. Le réchauffement s'y est fait brutalement avant. Et, pour ce qui est du monde entier, nous ne sommes pas capables de répondre, en particulier parce que tout l'hémisphère Sud est très mal couvert.

#### *La question du gaz carbonique*

Pour ce qui est du rôle du gaz carbonique, nous nous posons encore quelques questions. Celles-ci portent essentiellement sur le fait que les spécialistes semblent ne pas douter que l'augmentation de sa concentration dans l'atmosphère depuis plus d'un siècle se traduit par un effet thermique (le « bilan radiatif » est exprimé en terme de bilan de chaleur ou d'énergie par unité de surface, donc en watts par mètres carrés -  $W/m^2$ ) qui serait bien compris et dominerait tous les autres facteurs. Or il nous semble que d'autres facteurs potentiels pourraient introduire des contributions au bilan radiatif d'un ordre de grandeur pas si éloigné. Nous ne disons pas : « ce n'est pas le  $CO_2$  », mais nous nous étonnons du degré de sûreté avec lequel la plupart de nos collègues affirment que sa responsabilité est désormais démontrée. Et ce d'autant plus que nous commençons à douter de la solidité de la signification du réchauffement global, au moins exprimé à travers la température globale, comme on vient de le voir. Nous pensons qu'il y a encore de la marge avant d'en être certain ! Le flux de chaleur moyen qui atteint « par le haut » l'atmosphère terrestre est de l'ordre de  $350 W/m^2$  ; l'effet additionnel dû à l'accroissement des gaz à effet de serre depuis 150 ans est estimé

***Que ce soit pour les mesures précises de l'irradiance solaire, du niveau des mers, de l'intensité des rayons cosmiques ou de leur effet sur les nuages, on se heurte toujours au fait que les observations quantitatives de haute qualité sont récentes (l'ère des satellites) et ne permettent pas les comparaisons avec le passé !***

à  $2,5 W/m^2$ . Combien pour les autres facteurs ? Quel est le rôle des nuages ? Ils réfléchissent et renvoient environ  $80 W/m^2$  vers le haut. En fait, on ne comprend encore que très mal la physique des nuages : si un facteur externe était capable de changer de 3 % la couverture nuageuse, cela ferait  $2,4 W/m^2$ , autant que pour le gaz carbonique. Or certains chercheurs pensent que les variations du flux de rayons cosmiques, qui sont de plusieurs dizaines de %, sont capables de changer la cou-

verture des nuages, principalement de basse altitude. Celle-ci n'est bien connue (par les observations satellites) que depuis 30 ans, c'est-à-dire hélas le début supposé du réchauffement global. Que ce soit pour les mesures précises de l'irradiance solaire, du niveau des mers, de l'intensité des rayons cosmiques ou de leur effet sur les nuages, on se heurte toujours au fait que les observations quantitatives de haute qualité sont récentes (l'ère des satellites) et ne permettent pas les comparaisons avec le passé ! Ainsi, depuis 1978, depuis 30 ans que l'on mesure dans le détail les variations de l'irradiance solaire (la quantité totale d'énergie dans toutes les longueurs d'onde envoyée par le Soleil sur la Terre), on constate que l'amplitude de ces variations entre deux cycles de 11 ans est d'environ  $0,1 W/m^2$  et l'amplitude au cours d'un cycle de  $1 W/m^2$ . Mais si l'on prend les variations de haute fréquence, c'est un peu plus de  $4 W/m^2$ . Pour pouvoir être comparés aux variations

du bilan radiatif dû aux gaz à effet de serre, ces chiffres doivent être divisés par 4 (la chaleur incidente sur la surface de la Terre vue du Soleil,  $\pi R^2$  est répartie en une journée sur toute la surface de la Terre en rotation sur elle-même soit  $4\pi R^2$ ). Si les variations de haute fréquence étaient un facteur forçant significatif (à travers des processus non linéaires encore mal connus), la contribution au bilan serait néanmoins de l'ordre de la moitié de l'effet du  $CO_2$ . Et si l'on prend en compte les diverses sources d'incertitude des calculs sur les modèles qui prédisent le climat du prochain siècle, on a des marges d'erreur du même ordre de grandeur.

Donc, beaucoup de facteurs certains ou potentiels et de marges d'incertitude se situent entre 1 et 3 watts/ $m^2$ . Dire que l'un des phénomènes dépasse l'autre de façon écrasante et démontrable aujourd'hui est un peu osé du strict point de vue de la rigueur scientifique. Comme on pense avoir bien compris aujourd'hui l'action du gaz carbonique, on le fait entrer dans les modèles, également pour les éruptions volcaniques ; en revanche les nuages, les rayons cosmiques et le Soleil sont associés à des processus encore mal connus donc peu ou pas modélisés. En exagérant le trait, cela fait un peu penser à l'histoire de l'homme qui cherche sa clef sous le lampadaire.

*Quelles leçons apporte la connaissance des climats du passé ?*

Les échelles emboîtées du passé sont susceptibles d'apporter des informations complémentaires. Elles nous donnent accès au temps profond de Braudel et au-delà. Elles sont indispensables, mais naturellement de plus en plus incertaines quand on s'éloigne. Je viens de parler du passé récent de 1850 à nos jours. Le premier recul nécessaire dans le passé, ce sont les derniers 1000 ou 2000 ans. Le second pas, c'est d'aller jusqu'aux ères glaciaires et à l'échelle de plusieurs centaines de milliers d'années. Les réponses ne sont pas les mêmes. Chacune de ces échelles de temps fournit des données intéressantes mais très différentes. À l'échelle du dernier millénaire, il y a la fameuse courbe « en crosse de hockey » qui montre l'explosion des températures au cours du dernier siècle. Comme il n'y a pas assez de mesures directes de la température avant 1850, il faut rechercher un indicateur indirect : on utilise en général l'épaisseur des anneaux d'accroissement annuel des arbres. Mais un article important de Moberg et co-auteurs paru en février 2005 dans le journal *Nature* montre que les arbres enregistrent mal les variations de longue période qui sont en revanche mieux enregistrées dans les sédiments. En combinant les résultats des arbres et ceux des sédiments, les auteurs reconstituent une courbe de température qui est assez différente de celle que tout le monde connaît. On y voit très bien l'importance du réchauffement de l'an 1000, mis en évidence par notre confrère historien Emmanuel Leroy-Ladurie, cet « optimum climatique médiéval », l'époque du Groenland « vert ». On y voit ensuite le « petit âge glaciaire », qui commence au XVI<sup>e</sup> siècle et se prolonge jusqu'en 1870 environ. Dans la courbe de Moberg *et al.*, le réchauffement climatique récent ressemble un peu à celui de l'an 1000 ; s'il est un peu supérieur, rien ne permet d'un point de vue statistique de dire que l'on ne va pas se retrouver dans la même situation. On a peut-être un peu trop oublié l'effet d'un cycle millénaire du Soleil, un réchauffement qui serait significatif mais réversible, un élément important de la variabilité naturelle du climat...

On recule ensuite à la période de 400 000 ans qui couvre les quatre derniers grands cycles glaciaires, ces cycles de Milankovitch dus aux fluctuations de l'orbite terrestre autour du Soleil sous l'effet des planètes géantes lointaines. Notre confrère Jacques Laskar a montré comment modéliser ces fluctuations et l'analyse de carottes de glace provenant de l'Antarctique puis de l'Arctique, effectuée notamment à Grenoble par Jean Jouzel et ses collègues, a mis en évidence des variations

en dents de scie de la température et du gaz carbonique. Nous sommes maintenant dans un de ces « optimums climatiques » interglaciaires qui se produisent tous les 100 000 ans. Les résultats les plus récents montrent que les variations du gaz carbonique mesurées dans les bulles d'air trouvées dans les carottes de glace se produisent quelques siècles après les variations de température, et traduisent donc tout simplement le réchauffement (ou le refroidissement) des océans par le Soleil qui provoque un dégazage (ou une redissolution) du gaz carbonique. Pour ces périodes, c'est principalement la température qui contrôle le gaz carbonique, et non l'inverse comme il est proposé aujourd'hui pour les rejets gazeux anthropiques. Les deux sont possibles, mais alors les observations concernant les cycles de Milankovitch ne peuvent être prises comme un argument d'évidence en faveur de l'interprétation de la situation nouvelle créée par l'homme. Et nous voyons qu'avec cette nouvelle vision des cycles de Milankovitch, de la courbe de températures du dernier millénaire de Moberg, de l'allure de l'évolution fine de la température en Europe ou en Amérique, nombre des bases « pédagogiques » de la vision généralement acceptée du réchauffement climatique semblent plus discutables. C'est ce qui me conduit à oser formuler des doutes sur

***C'est ce qui me conduit à oser formuler des doutes sur la phrase précise du rapport du GIEC faisant état d'un degré de confiance de 90 % dans l'hypothèse aujourd'hui dominante et très médiatisée.***

la phrase précise du rapport du GIEC faisant état d'un degré de confiance de 90 % dans l'hypothèse aujourd'hui dominante et très médiatisée. Ce qui ne veut pas dire pour conclure qu'il faille se comporter de façon écologiquement irresponsable. Il est vrai que le gaz carbonique a augmenté de façon considérable depuis quelques décennies. Et si je ne suis pas persuadé que l'effet sur la température du globe soit démontré, rien n'interdit que ces effets apparaissent dans le futur (et l'un des principaux risques est l'acidification des océans). Et il y a maintes raisons de consommer de manière plus parcimonieuse nos réserves en combustibles fossiles, dont on saura sans doute tirer dans quelques décennies ou quelques siècles des molécules nouvelles et des applications plus intéressantes que de casser ces molécules dans des moteurs. Enfin, il ne faut pas que cette affaire du réchauffement climatique masque des enjeux dont on peut penser qu'ils sont peut-être encore plus urgents : l'accès à l'eau au XXI<sup>e</sup> siècle, le traitement des déchets dans des civilisations de plus en plus urbaines, sans parler des grandes pandémies, de l'accès à l'éducation et à la parité des femmes, ou tout simplement des 800 millions d'habitants de notre planète qui survivent (aujourd'hui, pas dans 100 ans) en-dessous du seuil de pauvreté et souffrent de la faim. La science, la communication et l'action politique ne font pas toujours aussi bon ménage qu'elles le devraient ■



# Le théorème des quatre couleurs : ingénierie d'une preuve formelle

Par **Georges Gonthier** et **Benjamin Werner**

Chercheurs, au Centre de recherche commun Inria-Microsoft Research

**L**a résolution du problème des quatre couleurs par Appel et Haken en 1976, à l'aide d'un calcul compliqué sur ordinateur, n'était pas seulement la fin de l'histoire d'un casse-tête séculaire. C'était aussi le début d'une polémique sur l'utilisation des ordinateurs en mathématiques : un calcul comme celui de Appel et Haken pouvait-il vraiment avoir valeur de preuve ? Trente ans plus tard, en 2005, nous pouvons enfin répondre par l'affirmative : il est possible de construire effectivement une preuve complètement formelle du théorème des quatre couleurs, dont la correction ne repose que sur des calculs simples et reproductibles, et dont la composition apporte un nouvel éclairage sur le problème.

Une partie de ce résultat était théoriquement prévisible. Les travaux des logiciens du début du XX<sup>e</sup> siècle comme Hilbert et Russell avaient depuis longtemps établi qu'une démonstration mathématique peut en principe se décomposer en étapes élémentaires obéissant à un petit nombre de règles et d'axiomes, et vérifiables de manière purement formelle. Dès les débuts de l'informatique, avec Church et Turing, on disposait de modèles mathématiques rigoureux de calcul pour les ordinateurs. Par composition, il devait donc en principe être possible de produire une preuve formellement vérifiable couvrant tous les aspects de la démonstration de Appel et Haken. Ce qui est vraiment nouveau, c'est que cette preuve for-

melle soit pratiquement réalisable, et de surcroît pertinente. En mathématiques, il est largement admis qu'il est parfaitement inutile, voire nuisible, de rédiger une preuve au dernier niveau de détail, car une formalisation excessive obscurcit le sens des arguments et conduit à des calculs d'une complexité ingérable. En informatique, on renonce en général à démontrer mathématiquement la correction de programmes, à cause de la complexité ou de l'inefficacité des modèles de calcul, et on se contente de données empiriques, comme les tests et régressions.

Ce sont ces deux renoncements que nos travaux remettent en cause. Nous soutenons que les progrès conjugués de la science et de la technique en informatique permettent de surmonter les difficultés techniques qui ont motivé ces impasses. Nous étayons cette thèse en exhibant une preuve formelle du théorème des quatre couleurs, rigoureusement et efficacement vérifiable, qui éclaire et approfondit la preuve classique dont elle s'inspire (due à Robertson, Sanders, Seymour et Thomas). En outre, comme la preuve est entièrement vérifiée par le calcul, il n'est pas nécessaire de la relire en entier pour s'assurer de l'authenticité du résultat, il suffit d'en lire les 0,2 % qui correspondent à l'énoncé mathématique du théorème.

Nos travaux s'appuient sur un ensemble de résultats en logique, informatique théorique, algorithmique, et génie logiciel. En particulier nous avons construit notre preuve dans le système Coq développé à l'Inria – Institut national de recherche en informatique et automatique. Le système Coq est *un assistant à la preuve* – un programme qui permet de transformer automatiquement un schéma de preuve en une preuve formelle détaillée et de vérifier rigoureusement la correction de cette dernière. Les

premiers assistants à la preuve remontent à une trentaine d'années (Coq lui-même a 20 ans), et ont fait des progrès considérables durant cette période. Ils ont déjà trouvé de nombreuses applications dans la vérification du *hardware* comme du logiciel. Toutefois, bien que de nombreux résultats plus ou moins élémentaires des mathématiques classiques aient déjà été formalisés en utilisant des assistants à la preuve, c'est la première fois qu'une démonstration hors de portée des traditionnels papier et crayon est entièrement formalisée sur un ordinateur.

Le langage de Coq combine des programmes informatiques (semblables à ceux écrits en Java ou C#) avec la logique mathématique. Cette particularité nous a permis d'utiliser la technique dite de *réflexion calculatoire*, consistant à intégrer des calculs de programmes à l'intérieur d'énoncés mathématiques ; la logique de Coq permet une exécution directe et efficace de ces programmes intégrés. Nous avons exploité la réflexion calculatoire de deux façons. Utilisée à grande échelle, elle nous a servi à effectuer les gros calculs nécessaires à la preuve. C'était une nécessité pratique : autrement, la taille de la preuve détaillée aurait été proportionnelle à la taille des calculs, lesquels explorent plus d'un milliard de cas de coloriage ! À petite échelle, nous avons souvent préféré les programmes à la logique formelle pour représenter des propriétés mathématiques. Nous avons réalisé que de tels "petits programmes" étaient une manière très efficace d'automatiser la plupart des étapes mineures de la preuve, au point que nous n'avons que rarement eu besoin de recourir aux techniques de "recherche de preuve", plus sophistiquées mais quelque peu moins fiables, qui tentent de reproduire le raisonnement humain. L'utilisation à grande échelle montre que les assistants de preuve sont suffisamment efficaces pour effectuer des calculs substantiels. Coq en particulier bénéficie maintenant de techniques venues des langages de programmation et la vérification de la preuve complète prend moins de deux heures.

Nous avons principalement utilisé des techniques issues du génie logiciel pour résoudre les problèmes de complexité inhérents à un projet de cette ampleur. Par exemple, nous avons cloisonné la preuve, isolant les parties algorithmiques, combinatoires, et topologiques. Dans la partie algorithmique nous avons remplacé les méthodes *ad hoc* par des algorithmes connus, issus pour la plupart de travaux sur la vérification formelle – exploration de modèles, interprétation abstraite, arbres de décision canoniques, automates à piles, exploration alpha-bêta –. La réflexion calculatoire à petite échelle

nous a permis de prouver ces programmes par exécution contrôlée, c'est-à-dire en les déboguant. Dans la partie combinatoire (essentiellement, en théorie des graphes), nous avons utilisé des hypercartes (triplets de permutations) plutôt que des graphes sur la sphère, ce qui nous a permis de limiter à la partie topologique le raisonnement non-intuitionniste, et de remplacer systématiquement les appels un peu flous à l'intuition géométrique du lecteur par des identités algébriques compactes et précises.

***En 1852  
Francis Guthrie,  
cartographe  
anglais, remarque  
qu'il lui suffit  
de quatre couleurs  
pour colorer  
la carte (pourtant  
fort complexe)  
des cantons  
d'Angleterre, sans  
donner la même  
couleur à deux can-  
tons adjacents  
(ayant une frontière  
commune).  
Il demande donc à  
son frère Frederick,  
mathématicien,  
si cette propriété  
ne serait pas vraie  
en général pour  
toute carte plane ;  
celui-ci commu-  
nique la conjecture  
à De Morgan,  
et en 1878 Cayley  
la publie.***

Ces techniques, en association avec de nouveaux schémas de preuve pour Coq, nous ont permis de garder la maîtrise de la taille de notre preuve (moins de 20 000 lignes de preuve) et surtout de sa compréhension. De fait, les impératifs de la preuve formelle nous ont forcés à clarifier et souvent reformuler plusieurs points de la preuve. Par exemple, pour pouvoir séparer topologie et combinatoire nous avons défini un analogue combinatoire, du théorème de Jordan et démontré son équivalence avec la formule combinatoire d'Euler ; par la suite, dans la partie topologie, nous avons découvert que la preuve du théorème des quatre couleurs ne dépendait ni du (vrai) théorème de Jordan, ni même de la construction du graphe dual, comme on le prétend habituellement. Nous avons démontré qu'une partie de la recherche combinatoire (l'inévitabilité) pouvait se simplifier considérablement, parce qu'il suffisait de rechercher des homomorphismes et non des isomorphismes. Loin d'obscurcir la preuve, notre formalisation en a donc éclairé le fonctionnement.

Nous pensons que nos travaux préfigurent plusieurs évolutions, à la fois en mathématiques et en informatique. La faisabilité de preuves formelles irréfutables va en faire un moyen effectif de résolution de controverses mathématiques, dont le théorème de Hales (conjecture de Kepler) sera sans doute le prochain exemple. L'intérêt intrinsèque de ces preuves va en faire un nouvel outil pour l'investigation des problèmes mathématiques, qui amènera sans doute de nouvelles découvertes. Enfin nous nous attendons à ce que notre travail ait également un impact sur la manière de valider formellement des logiciels. Nous nous sommes aperçus que notre style de formalisation axé sur la réflexion calculatoire permet souvent de mener des preuves d'une manière bien plus proche du test et de la mise au point de programmes que de la déduction mathématique traditionnelle. Ainsi, il pourrait s'avérer bien plus facile de faire utiliser des assistants de preuve à des ingénieurs informaticiens pour vérifier des programmes que de leur faire faire des preuves de correction en utilisant des mathématiques conventionnelles ■



# Premières réunions du groupe « Histoire des sciences et épistémologie »

Par **Pierre Buser**

1. Membre de l'Académie des sciences, professeur émérite à l'université Pierre-et-Marie-Curie

**A**u cours de la séance du 19 avril 2004, l'Académie a accepté une proposition de création d'un groupe qui aurait pour objectif de se préoccuper de l'histoire des sciences et de l'épistémologie. Ce groupe, dont j'ai pour l'heure, avec Claude Debru, la responsabilité, est actuellement composé d'un certain nombre de confrères, à savoir Jean-François Bach, Claude Balian, Henri Cabannes, Claude Combes, Jean Dercourt, Anne Fagot-Largeault, Paul Germain, Etienne Ghys, Maurice Goldman, Yves Jeannin, Jean-Pierre Kahane, Yves Laporte, Guy Laval, Pierre Lelong, Dominique Meyer, Jean-Claude Pecker, Georges Pedro, Jean-Paul Poirier, Yves Pomeau, Philippe Taquet. Florence Greffe, conservatrice en chef des Archives, est prête à nous assister.

Le groupe se propose d'examiner, dans toutes les disciplines que couvre notre Académie, des mathématiques

aux sciences du vivant, avec une extension dans le domaine de la cognition, les problèmes que soulèvent à la fois l'histoire des sciences et les réflexions philosophiques qu'elles peuvent susciter.

Voici une première étude historique, qui a été présentée, dans un passé récent, devant notre Académie : sur « Georges Cuvier ou la fulgurante ascension d'un bourgeois savant » par Philippe Taquet.

Merci à nos confrères d'avoir accepté de donner des exposés dont on ne doute pas qu'ils auront su et sauront encore intéresser l'ensemble de notre Compagnie. Bon vent, dirais-je volontiers, à notre essai d'intéresser notre Académie à l'histoire des sciences et à l'épistémologie. Certes, nombre d'entre nous en ont traité ici ou là bien des aspects. Mais n'était-il pas opportun d'officialiser davantage et de constituer un groupe de réflexion et de réunion ? L'avenir dira ce qu'il en sera ■

2. Dossiers réalisés sur le site de l'Académie des sciences :

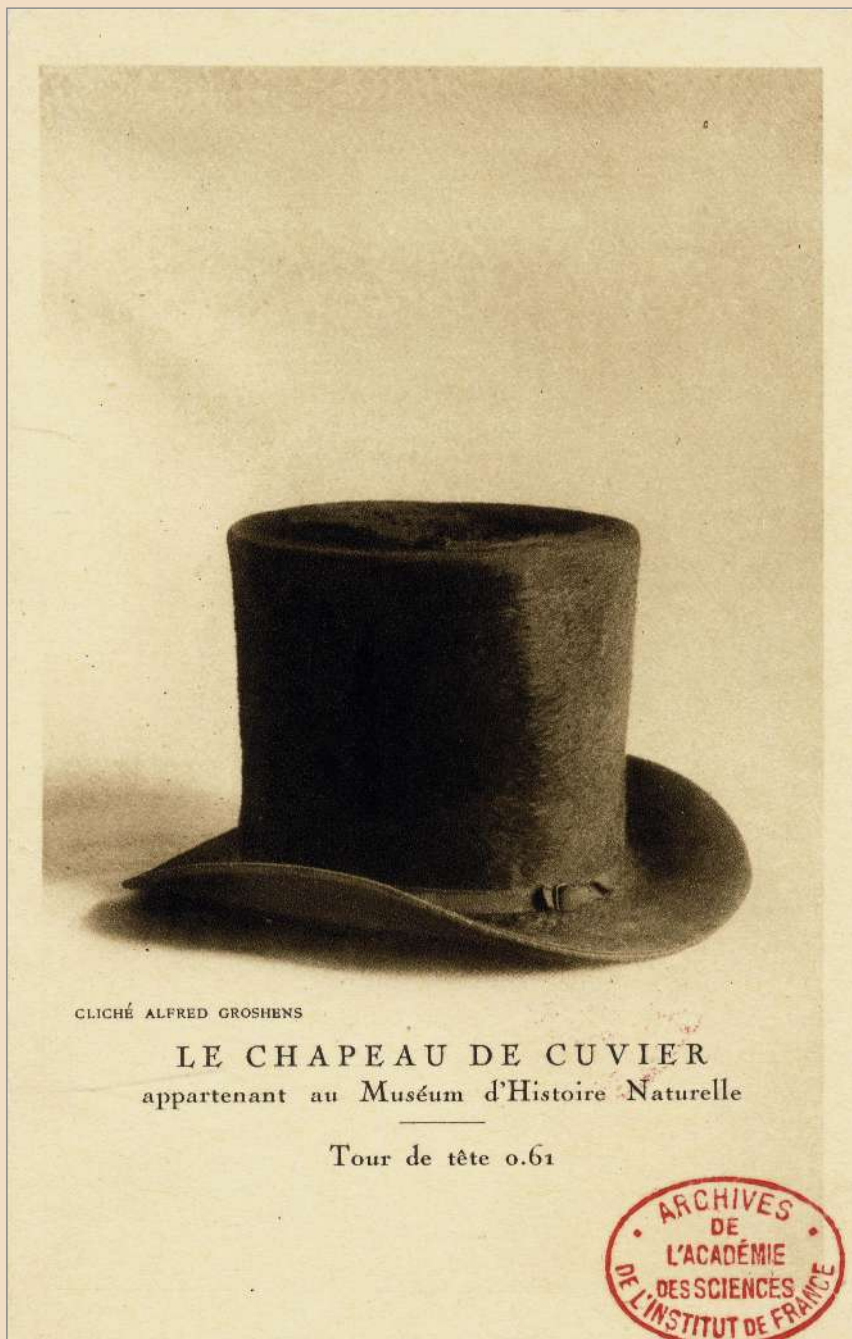
[http://www.academie-sciences.fr/membres/in\\_memoriam/roche/roche\\_œuvre.htm](http://www.academie-sciences.fr/membres/in_memoriam/roche/roche_œuvre.htm)

[http://www.academie-sciences.fr/membres/in\\_memoriam/Fourier/Fourier\\_œuvre.htm](http://www.academie-sciences.fr/membres/in_memoriam/Fourier/Fourier_œuvre.htm)

# Les années de jeunesse de Georges Cuvier

Par **Philippe Taquet**

1. Membre de l'Académie des sciences, professeur  
au Muséum national d'histoire naturelle



**G**eorges Cuvier fut l'une des figures majeures du monde des naturalistes du XIX<sup>e</sup> siècle. Son œuvre, immense, a donné ses lettres de noblesse à l'anatomie comparée et a jeté les fondements de la paléontologie des Vertébrés. Cuvier a examiné, disséqué et dessiné toutes les formes alors connues du règne animal et il a révélé au monde la nature et la diversité des ossements fossiles que l'on trouve dans les profondeurs de la terre. Ses apports ont tellement marqué les esprits que le grand romancier Honoré de Balzac a construit sa *Comédie humaine* comme une anatomie comparée des membres de la société française du XIX<sup>e</sup> siècle.

Avec ses *Leçons d'Anatomie Comparée*, avec son *Discours sur les Révolutions de la surface du globe*, avec son *Tableau Élémentaire de l'Histoire Naturelle des Animaux*, avec le *Règne Animal et l'Histoire Naturelle des Poissons*, avec les *Recherches sur les Ossements fossiles de quadrupèdes*, Cuvier a changé profondément la perception que l'homme a de la nature qui l'entoure ainsi que le regard qu'il porte sur l'histoire de la planète sur laquelle il vit.





G. CUVIER.

Aux talents de naturaliste, Cuvier sut ajouter des qualités d'organisateur hors pair et il fut appelé à remplir de multiples fonctions à la tête des institutions de la République, de l'Empire ou du Royaume : Secrétaire perpétuel de l'Académie des sciences, Inspecteur général de l'Instruction publique, Grand Maître de l'Université et des Facultés de théologie protestante, Directeur des Cultes non catholiques, Maître des Requêtes au Conseil

d'État, Cuvier eut une double vie, celle d'un scientifique et celle d'un administrateur.

Comment le fils d'un obscur militaire, aux revenus plus que modestes, originaire du pays de Montbéliard, fut-il conduit à mener une carrière scientifique hors du commun, à devenir l'une des figures marquantes de la science et à remplir de multiples fonctions à la tête des grandes instances de l'État français ?

Un examen approfondi des textes, lettres, documents, carnets et manuscrits de Cuvier permet de se rendre compte de la richesse et de la complexité du personnage, de ses sentiments, de son ambition, de sa forte personnalité, de sa passion monomaniaque pour l'histoire naturelle et enfin de sa stratégie pour publier ses premiers travaux et se faire connaître.

Très tôt, le jeune Cuvier découvre avec passion les sciences de la nature, les charmes de l'entomologie et de la botanique. Il reçoit d'abord à Montbéliard, puis à Stuttgart au sein de l'Académie Caroline, un excellent enseignement notamment en droit qui lui sera très utile plus tard dans les nombreuses fonctions administratives qu'il sera amené à occuper. Mais sa véritable passion demeure l'histoire naturelle et dès l'âge de dix-sept ans, il rédige plusieurs journaux consacrés à ses observations botaniques et entomologiques et il récolte plantes et insectes. Grand lecteur d'Aristote, il élabore très tôt le projet d'un nouveau plan d'une histoire naturelle générale, « pour rechercher les rapports de tous les êtres existants avec le reste de la nature » ; il devient un admirateur du suédois Linné et de ses méthodes de classification ; il découvre l'essai de classification méthodique des Mammifères de l'allemand G.C. Storr ; il est marqué par la personnalité du naturaliste allemand K.F. Kielmeyer ; il comprend tout l'intérêt de l'anatomie comparée à la lecture des travaux du français L.J.M. Daubenton ; il dévore avec enthousiasme les ouvrages du français A.L. Lavoisier qui propose une nouvelle approche de la chimie et les travaux d'A.L. de Jussieu qui publie une nouvelle méthode naturelle pour classer les végétaux, méthode qui tenait compte des corrélations entre les différentes parties des plantes.

Dès lors, Cuvier va s'inspirer du programme de recherche en botanique de Jussieu, pour faire de la zoologie, non une science de mémoire et de nomenclature, mais une science nouvelle, qui ait ses combinaisons, ses affinités comme la chimie et ses problèmes comme la géométrie.

En avril, au terme de son cursus universitaire, Cuvier effectue une randonnée de huit jours dans le Jura Souabe, dont le récit, de sa main, a été conservé. Obligé de gagner sa vie et faute d'un recrutement dans l'administration wurtembergeoise, Cuvier accepte un emploi de précepteur en Normandie auprès d'une famille luthérienne de Caen, chez le comte et la comtesse d'Héricy. L'enseignement du jeune Achille d'Héricy, alors âgé de treize ans lui laisse beaucoup de temps libre et il peut se consacrer à sa passion, la découverte des formes vivantes et particulièrement des espèces animales marines.

Pour mener à bien son projet, Cuvier sait qu'il doit se faire connaître de la communauté scientifique, en particulier des naturalistes parisiens travaillant au Cabinet d'histoire naturelle du Jardin du Roi ; il sait qu'en ces

lieux se trouvent accumulés les spécimens zoologiques qui lui sont indispensables pour réaliser les travaux dont il rêve. Cuvier adresse donc à l'entomologiste Olivier, aux zoologistes Lacepède et Geoffroy Saint-Hilaire des articles mettant en valeur ses capacités de naturaliste et ses talents d'observateur et de dessinateur.

Mais les événements de la Révolution française vont à partir de 1789 contrarier quelque peu les travaux du naturaliste en herbe. L'agitation gagne la campagne de Normandie ; Cuvier est obligé d'occuper la fonction d'agent salpêtrier, puis celle de secrétaire de la commune de Bec-aux-Cauchois. Les nombreuses lettres de Cuvier adressées à ses amis allemands et le registre des délibérations de la commune révolutionnaire donnent de nombreux détails sur les péripéties et les soubresauts qui rythment la vie des habitants de ce petit hameau durant la Terreur. Le jeune Cuvier donne avec beaucoup d'humour un compte-rendu de ces journées troubles, tout en jouant habilement un rôle de modérateur et en protégeant avec discrétion la comtesse d'Héricy devenue citoyenne, et son fils Achille.

Les premières publications de Cuvier et la précision de ses dessins impressionnent ; la qualité de sa description de la structure du larynx inférieur des oiseaux et du rôle que cet organe joue dans la fonction de chanter est appréciée à Paris au moment même où les professeurs du Jardin du Roi devenu en 1793 le Muséum national d'histoire naturelle, cherchent à recruter de jeunes naturalistes libres de tout lien avec l'ancien régime et professant les idées de Linné plutôt que celles de Buffon. Le jeune Georges Cuvier remplit ces conditions et il se rend à Paris en mars 1795 pour tenter sa chance ; nommé membre de la Commission temporaire des arts qui est chargée d'inventorier les saisies révolutionnaires pour les protéger du vandalisme, il est ensuite engagé en juillet 1795 au Muséum comme suppléant de Jean-Claude Mertrud dans la chaire d'anatomie des animaux du Muséum.

Alors commence une irrésistible ascension qui va conduire un jeune naturaliste presque inconnu à être nommé professeur d'histoire naturelle aux Écoles centrales de Paris, puis à la fin de l'année 1795, alors qu'il n'est âgé que de 26 ans, membre résidant de la section d'anatomie et de zoologie de la première classe de l'Institut national.

En neuf mois, un jeune provincial, désargenté, mais sûr de lui et de ses qualités de naturaliste, passe de l'ombre à la lumière.

Georges Cuvier est en route pour la gloire ■

Philippe Taquet : *Georges Cuvier. Naissance d'un génie.*  
Editions Odile Jacob. 2006.  
539 pages. ISBN 2.7381.0969.1





**P**ierre-Gilles de Gennes, né le 24 octobre 1932 à Paris, élu Membre de l'Académie des sciences le 19 mars 1979, section de physique, est décédé le 18 mai 2007.

### L'œuvre de Pierre-Gilles de Gennes

Pierre-Gilles de Gennes entre à l'École normale supérieure en novembre 1951. À l'époque, l'enseignement de la physique à la Sorbonne est sclérosé, entièrement fermé à la physique du XX<sup>e</sup> siècle : nous apprenons la mécanique quantique en lisant des livres ! Le déclic se produit à l'École de physique théorique des Houches en 1953, où nous recevons pendant deux mois intensifs un enseignement de pointe par de très grands physiciens, en particulier Rudolf Peierls, un des derniers « encyclopédistes ». Cette école hors du commun, bricolée par une jeune femme enthousiaste de 27 ans, Cécile de Witt, a joué un rôle crucial dans le renouveau de la physique européenne. Pierre-Gilles a toujours souligné l'importance des Houches dans son éveil scientifique : il a gardé à Cécile une reconnaissance fidèle.

L'année suivante nous préparons notre Diplôme d'études supérieures dans le laboratoire de semiconduc-

teurs de Pierre Aigrain. Pierre-Gilles ne sacrifie pas à la règle en vigueur, qui confiait aux diplômés la fabrication d'un matériel utilisé par la génération suivante (les crédits étaient inexistantes). Mais il a toujours dit que ce bref contact avec l'expérience lui avait été très bénéfique. Tous les matins nous avions une discussion passionnée avec Pierre Aigrain où nous devions dénicher la bonne idée parmi les dix farfelues qu'il avait inventées dans la nuit : c'est là que nous avons appris l'imagination et le goût du risque.

Son œuvre scientifique commence par un coup de maître puisque sa thèse sur le magnétisme reste un classique un demi-siècle plus tard. Après un séjour postdoctoral aux États-Unis, il est nommé professeur à Orsay en 1961. Son œuvre se déroule, par grands pans qu'il défriche, puis abandonne pour en aborder un autre. C'est d'abord la supraconductivité, vieux problème fraîchement renouvelé pour lequel il développe un petit groupe expérimental autour de thésards débutants et enthousiastes. Sa démarche théorique, très originale, s'attache à des effets concrets, structures de flux, comportement en surface, etc. Comparé aux théories en vigueur, il y a la même distance qu'entre l'onde plane de de Broglie et l'application de la mécanique quantique

à la matière condensée ou à la chimie. La moisson de résultats est impressionnante, le livre qu'il écrit en 1964 est un modèle du genre qui fait toujours autorité.

Des supraconducteurs il passe aux cristaux liquides où il fait renaître les travaux anciens de Georges Friedel. Il explore tous les aspects de ce domaine foisonnant, riche d'applications aujourd'hui entrées dans notre vie quotidienne. Nommé au Collège de France en 1970, il élargit encore plus son champ d'intérêt. La liste de ses 30 années de cours est impressionnante, passant de l'hydrodynamique aux polymères qui lui vaudront le prix Nobel en 1991, puis aux structures colloïdales. Il reprend le problème du mouillage qui n'avait guère évolué depuis les travaux de Thomas Young au début du XIX<sup>e</sup> siècle, et débouche sur une physique de l'adhésion très novatrice. À chaque fois, il introduit des concepts originaux qui renouvellent le sujet, apportent un éclairage différent et suggèrent développements et applications. La frontière entre physique et chimie s'efface peu à peu, s'ouvrant enfin vers la biophysique qui occupera ses dernières années.

Il y a un style « de Gennes », fondé sur une conjonction de qualités peu fréquentes chez les physiciens. L'élégance d'abord : Pierre-Gilles est un grand seigneur, au jugement très sûr sans aucune forfanterie. Élégance de la pensée : ses articles sont d'une clarté limpide, dégageant les idées essentielles avec un strict minimum de formalisme. Il préfère les arguments physiques « avec les mains » au rouleau compresseur du formalisme (il est en fait d'une grande rigueur : derrière l'élégance du résultat final se cachent souvent des calculs ardu, nécessaires mais qui pour lui ne sont que des outils). Élégance de la parole aussi : ses exposés sont brillants, tout semble évident, mais les lendemains ne chantent pas toujours car nombre des auditeurs n'ont pas l'expérience sur laquelle s'appuie son discours. Ceci dit, quel régal ! L'originalité ensuite. Ses premiers travaux sur le magnétisme et la supraconductivité s'inscrivaient dans une actualité brûlante, mais dès 1970 il s'engage dans des voies beaucoup plus inattendues, dans une physique classique qui n'est plus guère de mode à l'époque. Le brio avec lequel il donne une nouvelle jeunesse à des domaines que l'on croyait révolus est étonnant. La curiosité enfin, insatiable ! Nous vivons une époque de spécialisation. Les chercheurs sont de plus en plus cantonnés dans un créneau étroit. Pierre-Gilles était tout l'inverse, toujours à l'affût de problèmes nouveaux qui l'entraînaient bien loin de son douar d'origine. C'est peut-être dans sa formation initiale du groupe II de l'École normale, à cheval entre physique et biologie, qu'il faut chercher l'origine de cette démarche « naturaliste » de la science, où l'on observe avant de comprendre, où le phénomène a plus d'importance que sa formulation. Pierre-Gilles est un explorateur, presque un aventurier, plus enclin à se tailler une voie à coups de serpe qu'à

cultiver un jardin de curé. Il aurait eu sa place à la grande époque du XVIII<sup>e</sup> siècle où l'Académie envoyait une équipe de savants en Amérique du Sud, en principe pour mesurer le méridien, mais en fait pour tout découvrir sur ce continent inexploré. Les savants étaient physiciens, astronomes, géologues, botanistes aux curiosités multiples !

Dernier volet, et non des moindres, son souci du concret, qui l'amène tout naturellement à s'intéresser aux applications de ses travaux. Il a beaucoup milité en ce sens, surtout dans la période récente. Mais son discours ne reflétait pas toujours la subtilité de son apport : en fait il ne participait pas à l'élaboration d'un produit, qui n'est pas le rôle du physicien, mais dégageait les idées simples, les ordres de grandeur, le langage, bref les bases sur lesquelles pouvaient s'appuyer les ingénieurs au contact immédiat des réalités. C'est la noblesse de la physique appliquée, qui n'est pas d'élaborer des recettes, mais d'ouvrir une voie. Ce partage des tâches fonctionnait merveilleusement bien dans les années 50-60 lors de la révolution des semi-conducteurs : chacun était à l'écoute de l'autre. Pierre-Gilles a fait revivre cette démarche dans le domaine de la physicochimie, peut-être parce que son aura emportait l'adhésion de tous, il faut deux partenaires pour coopérer !

Esprit non conformiste, plus sensible à l'épanouissement de l'individu qu'aux règles de la société, Pierre-Gilles déplorait la rigidité du système éducatif français, construit autour de programmes et d'examens codifiés, outil de sélection beaucoup plus que d'éveil. Devenu une célébrité après le prix Nobel, il a pris son bâton de pèlerin pour aller dans les lycées de France et de Navarre dire que la physique pouvait être passionnante, que la vie de tous les jours regorgeait de questions que l'on pouvait poser et résoudre dans un langage simple, qu'observer et comprendre était plus important que le formalisme. L'avenir dira s'il a été entendu ■

**Philippe Nozières**

### **Académie des sciences**

Un hommage solennel à Pierre-Gilles de Gennes, Prix Nobel de physique, décédé le 18 mai 2007, a été rendu par le Président de la République le 5 juin 2007 au Palais de la Découverte. Nicolas Sarkozy a salué avec respect et émotion le grand physicien et « son âme d'enfant », source d'une insatiable curiosité. Au cours de cette cérémonie, ont également pris la parole plusieurs académiciens, Jules Hoffmann, Jacques Friedel, Philippe Nozières et Claude Allègre, ainsi qu'Étienne Guyon, directeur honoraire de l'École normale supérieure, Jean-François Joanny, directeur du laboratoire physicochimie de l'Institut Curie et Philip Pincus, professeur à l'Université de Californie Santa Barbara.



**F**rançois Morel, né en Suisse le 22 février 1923, élu Membre de l'Académie des sciences le 6 juin 1988, section de biologie moléculaire et cellulaire, génomique, est décédé le 9 mai 2007.

#### L'œuvre de François Morel

François Morel était docteur en médecine et licencié ès sciences de l'université de Genève, docteur ès sciences de l'université de Paris, professeur à la faculté des sciences de Paris, puis au Collège de France (chaire de physiologie cellulaire). Très vite attiré par la démarche expérimentale, il laisse le souvenir vivace d'une œuvre originale et pionnière en physiologie rénale marquée par une démarche intellectuelle rigoureuse.

Il arrive à Paris à l'âge de 24 ans et s'intéresse au début de sa carrière à l'équilibre hydro-minéral réglé par les phénomènes de transport des ions et de l'eau à travers les membranes cellulaires. Pour analyser ce problème, François Morel procède selon la démarche intellectuelle qui lui sera coutumière et qui marquera ses nombreux élèves. Tout d'abord, il imagine des méthodes originales lui permettant de chiffrer et d'enregistrer la cinétique des transports des électrolytes et de l'eau en utilisant les isotopes radioactifs dont c'était l'une des premières applications en biologie. Il analyse ensuite mathématiquement les résultats, les modélise et en tire les conclusions. Cette première ligne de recherche a été favorisée par son passage au Commissariat à l'énergie atomique (CEA) et par sa fréquentation de Robert Courrier et de Frédéric Joliot-Curie au Collège de France.

La régulation par le rein de la composition du milieu intérieur pose un problème particulièrement complexe. Pour l'aborder, François Morel étudie les différentes entités qui composent le tube néphronique en analysant les caractéristiques de sécrétion et de réabsorption de l'eau et des électrolytes des différents segments du néphron. Il met au point la microdissection des néphrons ainsi que les microméthodes nécessaires à ces études. Il montre l'hétérogénéité fonctionnelle des différentes régions du tubule rénal en terme de transport hydrique et ionique, de métabolisme énergétique, d'activités enzymatiques et de réponse hormonale. Il étudie en particulier avec ses collègues l'action de la vasopressine, de la calcitonine et de la parathormone sur les différents segments du néphron chez le rat et chez l'homme. Ainsi peut-il établir avec son équipe la fonction physiologique de chacune des parties du néphron, étape indispensable pour intégrer la fonction globale du rein au niveau de l'organisme.

En 1964, François Morel est nommé professeur à la faculté des sciences à Paris où il enseigne la physiologie tout en continuant à diriger un laboratoire de physiologie physicochimique au CEA, devenu un véritable foyer d'activité biologique internationale. Il est nommé ensuite titulaire de la Chaire de physiologie cellulaire au Collège de France où s'effectueront son enseignement et ses recherches de 1967 à 1993.

François Morel était un observateur attentif et méticuleux de la nature. Il a exploité la richesse que peuvent offrir des modèles expérimentaux tirés de la physiologie comparée pour analyser des phénomènes complexes dans nombre de ses travaux : certains ont porté sur les capacités de réabsorption de l'eau et du sodium par le rein des rongeurs du désert qui s'accommodent de la sécheresse, d'autres sur le transport de l'eau et des électrolytes dans les épithéliums de réabsorption chez les batraciens. Émerveillé par la diversité et la beauté des papillons, il en a constitué avec patience et minutie une collection unique au fil des années.

François Morel s'est impliqué dans de nombreuses tâches intéressant l'orientation de la recherche scientifique de notre pays ; citons notamment l'animation d'une action "Biomembranes" et la réforme des diplômes d'études approfondies (DEA) des scientifiques, des pharmaciens et des médecins.

François Morel était un scientifique modeste, mettant en avant son équipe plutôt que lui-même dans ses découvertes. Toujours prêt à rendre service, il a formé toute une génération de scientifiques et de médecins à une méthodologie rigoureuse, solide et innovante au service d'idées et de concepts originaux. La communauté scientifique nationale et internationale perd l'un de ses pionniers de la physiologie rénale et l'Académie des sciences un ami ■

Pierre Corvol