

Questions sur le changement climatique et réponses proposées

La Rédaction¹.

La question s'est posée du bien fondé d'aborder la question du réchauffement climatique dans "*Géologues*", certains membres de l'UFG considérant qu'il n'incombe pas à la revue de s'aventurer sur un tel thème qui sort, pour l'essentiel, de notre compétence. Néanmoins, alors que le sujet a déjà été abordé par "*Géologues*" (n°148, mars 2006, actualisé dans l'article précédent), il nous a paru utile, maintenant que le rapport 2007 du GIEC est sorti (ce qui n'était pas le cas pour l'article de 2006) et sans rentrer dans les prises de position et les polémiques récentes², d'apporter des réponses sur un certain nombre de questions majeures soulevées par les uns ou les autres, en nous appuyant sur des lectures et surtout des entretiens avec des chercheurs travaillant effectivement sur ces sujets.

Ces questions relèvent de trois domaines qui s'entchevêtrent, ce qui malheureusement revient souvent à masquer la situation de connaissance réelle à laquelle on est parvenu et les incertitudes qui demeurent. Ces trois domaines relèvent respectivement de la science, de l'usa-

ge de la science et des priorités politiques. En adoptant le choix de tenter de répondre à des questions, nous ne faisons d'ailleurs que poursuivre une pratique du GIEC et, plus récemment, le chemin tracé par Jean Jouzel lors de sa conférence sur le changement climatique présentée à la suite de l'assemblée générale de la Société Française de Météorologie, le 4 mars 2010, au Palais de la découverte.

Le résultat que nous vous proposons n'a aucune prétention particulière, sinon d'essayer de voir plus clair sur la réalité de la recherche réalisée. La question centrale posée aux scientifiques s'occupant de modélisation du climat est de savoir si l'accumulation du CO₂ dans l'atmosphère comporte des risques pour l'humanité ou pas. Face à cette question, la prise en compte de divers paramètres n'a de justification que dans la mesure où ces paramètres ont une incidence par rapport à la question posée. Ceci nous conduit naturellement à aborder en premier la question des modèles climatiques.

1. Remerciements à Hervé le Treut, Jean Jouzel et Serge Planton pour leur aide dans l'élaboration de ce document.

2. Ouvrages de CJ Allègre (Plon, 2009), S Huet (Stock, 2010). Articles dans le Monde, pétition des chercheurs français...

Question 1

Les modèles sont-ils capables d'assurer des prédictions climatiques tellement les phénomènes en jeu sont complexes et divers ?

La modélisation est un exercice conceptuel utilisant un formalisme mathématique qui peut être utilisé dans un très grand nombre de domaines. Ceux qui critiquent les modèles climatiques considèrent que l'on maîtrise si peu les divers paramètres et leur rôle dans le climat que la modélisation devient un exercice virtuel, avec des incertitudes énormes. Le changement climatique n'est pas nié, c'est d'ailleurs une banalité pour qui étudie l'histoire de la Terre, mais certains considèrent que ce sont les modifications de paramètres naturels qui jouent le rôle majeur (insolation, océan...) et que le rôle de l'homme est négligeable.

Le présent et le passé : modèles météorologiques et modèles climatiques

Les modèles climatiques, développés par différentes équipes de chercheurs à travers le monde, ont pour but de restituer le mieux possible le climat présent, caractérisé, en particulier, à partir des lois fondamentales de la physique, ou de lois statistiques rendant compte de systèmes complexes (nuages, forêts). Les analyses d'observations météorologiques ou océaniques, l'étude des climats passés (reconstitués à partir de données paléoclimatiques), permettent de valider les modèles, de vérifier qu'ils rendent bien compte des mécanismes à l'origine de la variabilité naturelle du climat et de tester leur capacité à réaliser des prévisions et des projections à des échéances temporelles variées (quelques jours, quelques mois, quelques années). Les prévisions déterministes ne sont possibles que quelques jours à l'avance. Au-delà on ne peut raisonner que sur des moyennes statistiques. Il est possible d'exploiter la « mémoire » des conditions océaniques pour effectuer des prévisions saisonnières, permettant par exemple d'anticiper l'arrivée d'événements El Niño ou La Niña avec leurs incidences sur les moussons. Au-delà, il est possible de caractériser l'impact de changements prévisibles (augmentation des gaz à effet de serre), mais toujours de manière statistique. Bien sûr, une limite à ces exercices tient à ce que l'on ne sait pas prévoir les évolutions de certains déterminants du climat (variabilité solaire, volcanisme) et que les variations des émissions de gaz à effet de serre elles-mêmes relèvent plus d'une hypothèse de travail (reflétant différents scénarios socio-économiques dont on veut tester les effets) plus que d'une vraie prévision. Mais certains gaz à effet de serre ont une très longue durée de vie atmosphérique,

qui rend leur accumulation dans l'atmosphère partiellement prévisible.

On distingue donc les modèles climatiques des modèles météorologiques dont l'objectif est de prévoir les événements météorologiques de manière aussi précise que possible au jour le jour. Les modèles climatiques doivent quant à eux proposer des simulations à l'échelle d'années, de décennies, ou du siècle, et également se pencher sur la reconstruction des climats du passé à des échelles remontant sur des siècles, des millénaires, voire au-delà. Il est clair que les projections vers l'avenir ou la reconstitution des climats du passé étudient la réponse climatique à des éléments de forçages différents (variations astronomiques de l'insolation, scénarios très différents des gaz à effet de serre), mais elles utilisent les mêmes modèles, la même formulation physique et mathématique, et l'étude du passé constitue un outil de validation très utile. Les modèles météorologiques et climatiques partagent une histoire commune et la composante atmosphérique des modèles climatiques conserve une très forte parenté avec celle des modèles de prévision météorologique classiques, ce qui constitue aussi un élément de validation important.

Méthodologie

Comme les modèles de prévision météorologique, les modèles climatiques ne reposent que sur des lois physiques (conservation de la masse, de l'énergie, de la quantité de mouvement...) appliquées à des variables évoluant au cours du temps (pression, température, vent, humidité...) et des relations empiriques pour des processus de petite échelle. Celles-ci sont mises au point à partir de connaissances théoriques (interactions matière rayonnement, condensation, turbulence...) et de données expérimentales (obtenues en particulier au cours de campagnes de mesure).

La météorologie dynamique, de même que l'océanographie dynamique se sont développées sur des décennies à partir d'une imbrication étroite entre les développements théoriques et numériques et l'acquisition de plus en plus performante des observations grâce aux données recueillies en particulier par des réseaux d'observation météorologiques mis en place dans la deuxième moitié du XIX^e siècle et plus récemment grâce aux données d'observation des satellites. On retiendra ici que la modélisation climatique est devenue de plus en plus pluridisciplinaire et a obligé de nombreux chercheurs de disciplines différentes à travailler ensemble. Au fil du temps, les progrès réalisés dans les gros ordinateurs ont été également essentiels en augmentant considérablement les capacités de calcul.

Les progrès dans les modèles se sont d'abord exprimés dans l'écriture des équations mathématiques à caractère prédictif, à partir des équations de la mécanique des fluides. Ces équations ne pouvant être résolues analytiquement, il a fallu faire appel à leur discrétisation s'appuyant sur un maillage de quelques centaines de km de côté et quelques dizaines de mètres à quelques km d'épaisseur. La discrétisation se fait dans l'espace (nœuds du maillage) et dans le temps (instants précis séparés par un pas de temps), après filtrage des modes instables.

L'écoulement atmosphérique s'organise à grande échelle et, le plus souvent, respecte un équilibre dit géostrophique entre les forces de Coriolis (rotation de la Terre) et les forces de pression³ et un équilibre hydrostatique entre les forces de pression et la poussée d'Archimède. Les mêmes équilibres peuvent être utilisés pour caractériser l'océan. Toutefois, alors que dans l'atmosphère, les perturbations météorologiques s'effectuent à l'échelle de milliers de kilomètres (exemple de l'Europe de l'Ouest avec le jeu combiné de l'anticyclone des Açores et de la dépression d'Islande), les perturbations océaniques se développent à une échelle 100 fois moindre.

Sur le plan de la prévision météorologique, au-delà d'une dizaine de jours, le temps n'est plus prévisible, en raison du caractère chaotique⁴ de l'écoulement atmosphérique. Il en résulte qu'au-delà de ce délai, l'évolution du climat ne peut se comprendre, voire se prédire, que sous forme statistique. La prévision numérique du temps et la modélisation numérique du climat se sont donc développés parallèlement mais séparément, ce qui conduit de nombreux chercheurs à se spécialiser dans l'un ou l'autre champ, voire successivement. Aujourd'hui, l'échéance « utile » des prévisions météorologiques est passée de 2 à 5 jours. En matière de météorologie, c'est la précision géographique qui a été retenue, alors qu'en climatologie, on met l'accent sur la durée des simulations qui donne accès aux statistiques à long terme définissant le climat. En pratique, il s'agit d'évaluer et de comprendre les modifications des propriétés statistiques d'événements météorologiques ou environnementaux en considérant une période de référence de 30 ans (45 ans maintenant), que l'on fait se déplacer dans le temps.

Les modèles ont commencé à représenter la physique d'une colonne de l'atmosphère pour passer progressivement à des modèles climatiques de plus en plus complets, incluant une simulation explicite de l'écoulement atmosphérique et de ses fluctuations. Un maillage à 100 km de côté a été utilisé dans les modèles météorologiques dès les années 90. Pour les modèles climatiques, on est passé de 500 km au début des années 90, à 300 km

vers l'an 2000 et 100 km aujourd'hui sur les machines les plus performantes. Même si une part importante des écoulements atmosphériques peut être simulés avec une maille de 500 km, beaucoup de processus interviennent à des échelles beaucoup plus fines. Le processus de vérification des modèles est donc nécessairement double, au niveau des processus individuels eux-mêmes (campagnes d'observation sur le terrain, observatoires permanents, satellites dédiés), et au niveau global du comportement collectif de ces processus. Un vrai modèle climatique implique *a minima* un couplage entre modèles atmosphériques, modèles océaniques et modèles de la surface continentale.

Les modèles océaniques sont donc indispensables et ils ont aussi connu une très forte évolution. D'abord limités à la sphère chaude de surface, ils ont été ensuite étendus à toute la profondeur de l'océan. Contrairement à l'atmosphère, l'océan se caractérise par une très grande lenteur de mise à l'équilibre : environ 35 ans pour les 1 500 premiers mètres et un millier d'années pour toute sa profondeur.

La modélisation des surfaces continentales comprenait de prime abord une représentation des échanges d'énergie et d'eau avec l'atmosphère en incluant le rôle de la végétation. Actuellement, de nombreux modèles simulent aussi des cycles biogéochimiques, dont le cycle du carbone, et leurs interactions avec le climat. C'est ainsi que dans l'atmosphère, certains processus chimiques ont été introduits dans les dernières versions des modèles climatiques, comme les processus d'évolution de la couche d'ozone stratosphérique. Les bases de ces modèles chimiques sont souvent beaucoup plus empiriques que pour la composante physique des modèles d'atmosphère et d'océan, même si une démarche identique de validation s'appuyant sur des données d'observation à l'échelle des processus et à l'échelle globale reste de mise.

Étapes de progrès

Les progrès de la modélisation climatique s'étalent sur des décennies et l'on peut distinguer plusieurs étapes de progrès qui se chevauchent dans le temps et qui concernent à la fois la simulation des écoulements et celle des interactions avec le rayonnement solaire. La première étape porte sur les composantes du système climatique⁵. En effet, après s'être focalisés sur l'atmosphère depuis les années 50, les modèles climatiques ont progressivement pris en compte l'interaction avec les surfaces continentales, l'océan de surface puis profond, la banquise⁶, l'hydrosphère terrestre, la biosphère terrestre et marine, la chimie atmosphérique au niveau des processus, etc. Il faut considérer que cette prise en compte de

3. Sauf à l'équateur où l'annulation des forces de Coriolis fait que l'écoulement atmosphérique n'est plus géostrophique.

4. Voir article d'Edward Lorenz, 1963.

5. Terme préféré à « Système Terre » puisque la Terre interne n'est pas prise en compte sauf pour les éruptions volcaniques.

6. Les glaciers sont aussi pris en compte, mais pas la rétroaction de leur fonte sur l'évolution du climat. Les modèles de calottes glaciaires (Groenland, Antarctique) sont pris en compte dans les études paléoclimatiques, mais pas dans les modèles de climat puisque l'échelle de temps de leur fonte dépasse les pas de temps retenus dans ces modèles.

plus en plus intégrée s'est étalée sur des décennies, en étant de plus en plus performante au fil des années dans son aptitude à restituer les différentes variations géographiques et temporelles du climat de la Terre.

La construction des modèles s'est appuyée sur un travail considérable de recherche fondamentale. On peut par exemple citer le travail réalisé par les physiciens de la spectroscopie (étape 2) qui se sont penchés sur l'impact du rayonnement solaire, dont personne ne conteste le rôle primordial dans le « chauffage » terrestre, sur tous les composants de l'atmosphère, en particulier les gaz à effet de serre et les aérosols, permettant de cerner avec de plus en plus de précision les processus spécifiques les impliquant. Des progrès significatifs ont d'ailleurs été enregistrés dans les simulations climatiques à partir du moment où on a pris en compte les aérosols sulfatés ouvrant la voie à l'étude d'autres aérosols, carbonés notamment. Ces processus sont étudiés à une échelle de détail (sous-maillages) qui ne peut être directement prise en compte dans les modèles climatiques ; il faut donc les paramétrer (étape 3) pour qu'ils soient intégrables dans l'unité de découpage de la planète (la maille). D'autres processus devront faire l'objet d'études à l'échelle sous-maille, comme la condensation dans les nuages ou la turbulence.

La 4^{ème} étape concerne le processus itératif de comparaison avec les modèles météorologiques qui eux-mêmes ont été beaucoup enrichis au fil du temps, tout en fournissant une prévision qui reste dans les limites de quelques jours. Cette comparaison ne porte pas en fait directement sur les modèles tels qu'ils sont établis aujourd'hui, mais implique une ré-analyse des données météorologiques pour redéfinir les états initiaux, à l'échelle horizontale des régions et verticale de la colonne atmosphère – stratosphère, sur lesquels s'appuie la cartographie météorologique proposée au jour le jour. Une des difficultés porte sur l'hétérogénéité des données issues de changements dans les méthodes de mesure ou la position des stations. Il faut donc homogénéiser les données par les correctifs appropriés. La rétrospective porte aujourd'hui sur 45 ans, une échelle comparable à celle prise en compte dans les scénarios du GIEC.

Conclusions et perspectives

Aujourd'hui, une vingtaine de modèles climatiques intégrés, tous établis sur cette base, tournent en parallèle dans différents centres de recherche à travers le monde. Environ un tiers de ces modèles sont en Europe, un tiers en Amérique du Nord et le solde dans les autres pays. L'exercice de confrontation avec la situation réelle, par étapes successives a été permanent depuis les premiers

modèles, et organisé à l'échelle internationale depuis le début des années 90, ce qui a permis progressivement d'introduire de nouveaux processus à prendre en compte et de s'approcher, par étapes successives, d'une restitution de plus en plus précise de la situation prévalant actuellement sur la Terre.

Sur quelques décennies, ces questions ont mobilisé un nombre croissant d'équipes internationales au sein de grands programmes de recherche successifs.⁷ Le climatologue travaille avec une hiérarchie de modèles, en effectuant des allers et retours entre complexité et simplicité et en se référant étroitement aux reconstitutions faites à partir des données observées. Un modèle unique « du grand tout » serait une illusion dangereuse.

Au final, la démarche de travail adoptée est en permanence très contrôlée sur le plan scientifique et n'a cessé de progresser au fil des décennies, tant au niveau de la robustesse des calculs que de l'éventail des composantes introduites dans les modèles et d'un processus de validation permanente de comparaison avec la représentation actuelle du climat de la Terre, telle qu'elle dérive des études météorologiques et de la ré-analyse des données. On peut donc difficilement qualifier ce travail très détaillé et de longue durée d'exercice mathématique virtuel et ne se référant pas à une réalité observée.

Question 2

La vapeur d'eau, principal gaz à effet de serre, aux côtés des aérosols, joue-t-elle le rôle principal dans le changement climatique, auquel le CO₂ ne fait que se surajouter ?

Au départ de la question, il y a le fait reconnu que la vapeur d'eau est le principal gaz à effet de serre. Par voie de conséquence, pourquoi ne jouerait-elle pas en effet le rôle dominant, alors qu'on ne parle que du CO₂ dont les teneurs dans l'atmosphère sont minimales ? Par ailleurs, les nuages sont reconnus comme une grande source d'incertitude dans les modèles climatiques, et ils sont constitués par condensation de la vapeur d'eau.

Les constituants gazeux de l'atmosphère, tant naturels qu'anthropiques, absorbent et émettent un rayonnement à des longueurs d'onde données du spectre du rayonnement infrarouge thermique émis par la surface de la Terre, l'atmosphère et les nuages. C'est cette propriété qui est à l'origine de l'effet de serre naturel. La vapeur d'eau (H₂O) est le premier gaz à effet de serre, suivie par le dioxyde de carbone (CO₂), l'oxyde nitreux (N₂O), le méthane (CH₄) et l'ozone (O₃).

7. Global Atmospheric Research Programme (GARP), World Climate Research Programme, World Ocean Circulation Experiment, Tropical Ocean Global Atmosphere, Climate Variability, Global Energy and Water Experiment, International Geosphere Biosphere Programme, International Satellite Cloud Climatology Project...

On peut d'abord rappeler que c'est principalement grâce à l'eau, mais aussi aux autres GES (pour 30% environ), que la température moyenne sur Terre est d'environ + 15° C et non plus froide que -18 °C⁸. Grâce à l'eau, et aussi à la convection atmosphérique (montée d'air chaud) associée à la condensation nuageuse, que la moyenne des températures à la surface de la Terre ne s'élève pas au-dessus de 15°C.

Depuis les années 80, alors que la nécessité de mieux comprendre les mécanismes qui régulent la distribution de la vapeur d'eau et des nuages dans l'atmosphère s'est fait sentir, les calculs ont montré que tandis que le réchauffement direct en réponse à un doublement du CO₂ atmosphérique était de l'ordre de 1°C, on doublait sensiblement ce réchauffement avec l'amplification due à la vapeur d'eau. Il faut d'abord insister sur le fait que depuis les débuts des études de modélisation la vapeur d'eau est prise en compte dans les modèles, ce qui augmente les effets dus au réchauffement climatique. La composante directement issue des activités humaines, quantitativement négligeable, n'est pas spécifiquement prise en compte. Mais l'augmentation de la concentration de vapeur d'eau résultant indirectement du réchauffement climatique est, elle, bien prise en compte. Ce qui compte, comme pour tous les paramètres des modèles, ce sont les évolutions, les changements de concentration.

La vapeur d'eau est, sur le plan quantitatif, le premier gaz à effet de serre, mais deux effets tendent à atténuer cette prédominance. De fait, le CO₂ est le 1^{er} gaz à effet de serre directement modifiable par les activités humaines. Sa durée de vie atmosphérique (qui correspond à la disparition de 50% du CO₂) est de plus d'un siècle et le CO₂ se stocke dans l'atmosphère. Parmi les autres gaz à effet de serre (CH₄, N₂O, SF₆, HFC, PFC), le N₂O a une durée de vie comparable (112 ans), ce qui n'est pas le cas du CH₄ (12 ans). Cette diversité de durée de vie des GES a conduit à définir le Pouvoir d'échauffement global (PEG), avec un équivalent CO₂ pour chacun des gaz. À l'opposé de ce qui se passe pour ces gaz, l'activité humaine n'a que très peu d'influence directe sur la quantité de vapeur d'eau présente dans l'atmosphère parce qu'elle est recyclée en une semaine ou deux, sauf dans la partie haute (stratosphère) notamment par destruction chimique du CH₄, ce qui reste quantitativement modeste. Par ailleurs, la quantité de vapeur d'eau, limitée par le seuil de saturation, décroît très vite en altitude, précisément dans les couches où se fait l'émission de rayonnement terrestre vers l'espace et où se détermine l'effet de serre.

On peut souligner ici que le système climatique Terre est un système naturel et que des modifications

dans l'une quelconque de ses composantes entraînent des perturbations sur tout le système, ce qui s'exprime en termes de forçage radiatif, c'est-à-dire de modification dans l'équilibre entre le rayonnement solaire reçu et le rayonnement réémis par la Terre (infrarouge). Personne ne conteste aujourd'hui que les activités humaines ont entraîné un surcroît de présence de CO₂ dans l'atmosphère, puisque la teneur atteinte dépasse de loin le niveau maximum atteint au cours des derniers 800 000 ans (280 ppm en général). Mais il ne suffisait pas de souligner le parallélisme de l'évolution température - CO₂ comme l'ont montré les carottages dans les calottes glaciaires, il fallait aussi confirmer que ce sont les activités anthropiques qui sont à l'origine de l'augmentation très forte des dernières décennies, ce qu'ont fait les modélisations climatiques soulignant que les caractéristiques de la situation météorologique actuelle, qui portent sur une échelle de temps très courte, ne pouvaient s'expliquer sans cette intervention humaine. Comme toute modification apportée au système climatique naturel, ce surcroît de CO₂ conduit à mettre ce système en déséquilibre, un déséquilibre que l'on ne maîtrise pas.

Les fumées et les aérosols participent peu à l'effet de serre, mais ils ont pour effet de refroidir la planète en réfléchissant le rayonnement solaire, un effet limité dans le temps car les aérosols ne restent dans l'atmosphère que quelques jours à quelques semaines après leur émission. L'effet de refroidissement des aérosols comporte un effet direct et un effet indirect de condensation de vapeur d'eau dans les nuages, les rendant plus réfléchissants.

C'est la vapeur d'eau qui joue le rôle d'amplification le plus puissant des variations climatiques. Globalement, elle multiplie par 2 la sensibilité climatique telle qu'elle est simulée par les modèles. Toutefois, dans les régions saturées en vapeur d'eau, la température contrôle effectivement le niveau d'humidité, mais ce n'est plus le cas dans la grande ceinture des déserts, où l'on peut s'attendre à une plus grande sécheresse dans un climat plus chaud. C'est d'ailleurs cette ceinture qui sert de modérateur à l'humidification de l'atmosphère et au réchauffement par effet de serre et évite à la rétroaction positive de la vapeur d'eau de s'emballer.

Les nuages constituent de fait le plus grand des facteurs d'incertitude sur l'évolution future des climats. La condensation de l'eau qui les produit est presque toujours associée à une élévation de la température de l'air et elle se fait autour de petits aérosols ou noyaux de condensation. Les aérosols sont en partie d'origine naturelle et en partie d'origine anthropique. Dans les premiers, on trouve des poussières minérales, des sels marins, des

8. La température de -18° est calculée en ne prenant en compte que l'effet des gaz à effet de serre mais elle serait en fait beaucoup plus froide car elle se recouvrirait de glace et réfléchirait davantage de rayonnement solaire.

émissions biogéniques et des poussières volcaniques. Les seconds renferment en particulier des composés sulfurés et organiques issus de la combustion et des poussières industrielles.

Question 3

Peut-on confirmer que l'augmentation du CO₂ est la cause de l'augmentation de température ?

Personne ne conteste l'augmentation de la teneur en CO₂ de l'atmosphère depuis 150 ans et surtout au cours des dernières décennies, ni que les émissions de GES d'origine anthropique y ont contribué. Mais, bien avant l'ère industrielle, il y a eu de multiples augmentations de température, sans participation de CO₂ anthropique. Les mesures faites sur carottes de glace de l'Antarctique soulignent l'évolution parallèle entre température et CO₂. Les archives glaciaires sur 800 000 ans montrent que le CO₂ a constamment varié entre 180 ppm en période froide et 280 ppm en période chaude (avec un maximum isolé à 320 ppm pour un cycle).

Celui-ci n'est pas la cause première des grands cycles climatiques dont l'origine est liée aux variations d'insolation résultant des modifications de l'orbite terrestre, mais il a constitué un amplificateur des variations entre périodes glaciaires et interglaciaires. La séquence des événements observés lors d'une déglaciation est tout à fait compatible avec cette conclusion qui fait l'objet d'un large consensus. Elle fait néanmoins l'objet d'un débat. Certes, l'Antarctique se réchauffe en premier, précédant l'augmentation du CO₂ de quelques centaines d'années (Caillon *et al.*, 2003)⁹, mais cette dernière précède d'environ 4 000 ans la fonte de la calotte glaciaire accumulée sur les continents de l'hémisphère nord. Une fois que sa concentration a commencé à augmenter, le CO₂ a donc eu tout le temps de participer à cette déglaciation. Cette séquence est donc compatible avec un rôle amplificateur du CO₂ mais ce sont d'autres arguments qui ont conduit à proposer que l'effet de serre joue effectivement ce rôle. Seuls les modèles climatiques combinant les modifications d'insolation liées aux paramètres orbitaux, les rétroactions liées à l'albédo des glaces continentales et au forçage radiatif lié aux changements de concentration des gaz à effet de serre, parviennent à rendre compte de la rigueur des périodes glaciaires et des déglaciations. D'une façon générale, les études ont montré que sans les variations de l'effet de serre, les modèles ne parvenaient pas à reproduire l'amplitude des variations de température observées tout au long du Quaternaire. Les données du passé illustrent donc bien les liens entre cycle du carbone, effet de serre, bilan radiatif et climat et confirment que ce sont des

mécanismes d'amplification qui opèrent à ces échelles de temps.

Par contre sur les derniers 10 000 ans (dernier interglaciaire), la teneur en CO₂ est restée très stable, entre 270 et 280 ppm, résultat des échanges entre atmosphère, océan et végétation continentale. L'assèchement du Sahara, il y a 5 000 ans, est lié au phénomène de précession¹⁰ des équinoxes qui a amené la fin des moussons intenses associées à des étés très chauds dans l'hémisphère Nord. Les fluctuations climatiques plus récentes (Optimum médiéval et Petit âge de glace) pourraient, au moins partiellement, être liées à des variations de l'activité solaire.

L'apport des activités humaines a conduit à introduire progressivement une augmentation du CO₂ dans l'atmosphère, mais l'inertie thermique des océans a retardé aux années 80 et 90 le moment où l'augmentation consécutive de température est devenue clairement observable, traduisant une évolution qui s'est fortement accélérée depuis la 2^{ème} guerre mondiale alors que les émissions de CO₂ liées à l'usage des combustibles fossiles sont passées de 2 à 7,5 Gt/an. Il convient ici de distinguer très clairement des processus qui interviennent sur des échelles de temps géologiques et qui sont étudiés sur carottes de glace ou par d'autres méthodes et les processus qui conduisent à une augmentation récente très rapide des teneurs en CO₂ de l'atmosphère. Dans le premier cas, on est sur des évolutions naturelles, dans le second, sur une perturbation brutale sur une très courte durée dont l'origine ne peut s'expliquer par des phénomènes naturels.

L'idée d'un refroidissement global (*Global cooling*), propagée dans les années 70 et 80 ne correspond pas à la réalité des messages transmis dans les publications scientifiques d'alors. Une analyse par Thomas Peterson sur 71 d'entre elles, s'étalant sur la période 1965-1979, a montré que 44 évoquaient un réchauffement, 7 un refroidissement et que 20 couvraient les deux aspects.

Question 4

Le changement climatique n'est-il pas du pour l'essentiel à des phénomènes naturels liés à l'action du soleil ?

Nous abordons cette question car elle est fréquemment invoquée, bien qu'elle n'interfère pas directement avec la question centrale posée en préambule, sinon à considérer que l'activité humaine n'a aucun effet sur l'évolution climatique, ce qui n'est pas cohérent avec les réponses faites aux questions 1 à 3. Les travaux des géomagnéticiens de l'IPGP¹¹ soulignent le parallélisme entre

9. N. Caillon, J.-P. Severinghaus, J. Jouzel, J.-M. Barnola, J. Kang et V.-Y. Lipenkov, *Timing of atmospheric CO₂ and Antarctic temperature changes across termination-III*. *Science*, 299, 1728-1731, 2003.

10. Liée au déplacement de l'axe de rotation de la Terre, suite à l'action des marées lunaires et solaires. La précession des équinoxes déplace la position des équinoxes et des solstices dans l'ellipse terrestre sur une période de 21 000 ans environ.

11. Institut de Physique du Globe de Paris.

l'évolution des taches du soleil, celle du champ magnétique terrestre et la température du globe. Ils considèrent que c'est dans les variations du rayonnement solaire que doit être recherchée la cause principale du réchauffement climatique (cycles courts de 11 ans en moyenne et cycles de plus longue durée). Ils soulignent toutefois que ce rayonnement a changé de structure depuis une trentaine d'années, en lien avec l'accroissement des teneurs en CO₂ dans l'atmosphère. Pour eux, le cycle millénaire est clairement d'origine solaire.

Les travaux de plusieurs équipes d'astrophysiciens (Henrik Svensmark, Eigil Friis-Christensen, Nigel Calder, au Danemark, Eugene Parker aux États-Unis, Nir Shaviv en Israël) soulignent la convergence entre activité du soleil, rayonnement cosmique et formations des nuages, en particulier de basse altitude. Il en résulterait qu'une plus forte activité du soleil entraînerait un refroidissement de la Terre par développement des nuages et inversement pour le réchauffement. Ces corrélations s'appuient sur de nombreuses mesures en altitude issues des satellites d'observation. Les aérosols (travaux de Richard P. Turco) joueraient le rôle de catalyseur dans le développement des nuages, dans un environnement de haute atmosphère constitué de plasma. Après l'expérience menée en laboratoire dans le cadre du programme SKY, les travaux se poursuivent au CERN au sein du programme Cloud. La théorie de l'impact du rayonnement cosmique sur le climat terrestre a donné lieu à un ouvrage de Henrik Svensmark et Nigel Calder « *The Chilling Stars: A New Theory of Climate Change* » publié en 2007 et à un film « *The Cloud Mystery*, » produit par Lars Oxfeldt Mortensen et montré sur la TV2 danoise en avant-première en janvier 2008 et sur Arte le 2 avril 2010.

En premier lieu, on peut souligner que personne ne conteste le rôle des variations de l'activité du soleil (insolation) dans le changement climatique, même si l'on peut ensuite discuter des processus et de l'ampleur de l'impact des variations. Ce paramètre est d'ailleurs introduit dans les modèles climatiques (simulations du climat du dernier millénaire), mais il fait partie de ceux qui n'ont pas d'influence par rapport à la question centrale posée plus haut, à l'échelle de temps (50 - 100 ans) des projections climatiques proposées. Rappelons en outre¹² que les simulations des modélisateurs du climat pour le XX^e siècle se sont faites en prenant en compte l'évolution des forçages naturels (variabilité solaire, volcans) seuls ou en incluant aussi les forçages anthropiques (GES et aérosols) et que sans ces derniers on ne peut reproduire l'évolution du climat des dernières décennies.

Pour revenir aux forçages naturels, on peut rappeler que l'axe de rotation de la Terre, qui a tourné lente-

ment au fil des temps géologiques, fait un angle appelé obliquité (23° 27' actuellement) avec le plan décrit par la Terre dans son mouvement selon une ellipse autour du soleil. Cette obliquité détermine la quantité d'énergie solaire reçue dans chacun des deux hémisphères Nord et Sud, quantité variable selon les saisons. L'influence du soleil n'est pas contestée à l'échelle géologique (cycles astronomiques de Milutin Milankovitch sur 20 000, 40 000 et 100 000 ans, confirmés par l'analyse des carottes de glace dans le Groenland et en Antarctique). Les taches solaires correspondent à des zones sombres, donc plus froides, en lien avec le fonctionnement du magma solaire. Contrairement à ce qu'on pourrait imaginer, le rayonnement solaire augmente globalement avec le nombre de taches. Leur disparition presque totale au XVIII^e siècle (minimum de Maunder) est associée au Petit Âge de glace en Europe.

Question 5

Le réchauffement climatique n'aurait rien à voir avec les activités humaines ?

Cette question rejoint *pro parte* les deux précédentes¹³. Il est exact de dire que la teneur en CO₂ de l'atmosphère a constamment fluctué dans le temps géologique, comme le confirment les analyses faites pour les derniers 800 000 ans sur les carottes de glace de divers forages et notamment celles du projet EPICA, qui s'expriment par des courbes étroitement corrélées entre température, CO₂ et CH₄. Les conclusions de l'étude des carottes soulignent que l'insolation est le facteur primaire du réchauffement et que les GES constituent un facteur d'amplification très important du phénomène.

L'étude des carottes de glace et celle des sédiments océaniques et continentaux montrent que durant un interglaciaire, la température moyenne du globe est montée de l'ordre de 5 degrés par rapport à celle d'une période glaciaire. Il s'agit d'un ordre de grandeur similaire à celui des scénarios de projection climatique du GIEC à la fin du siècle. Toutefois, la régionalisation des phénomènes induits reste entachée de grandes incertitudes, dès lors que l'on essaie de mieux cerner les zones précises de sécheresse croissante ou d'humidité croissante.

Comme nous l'avons indiqué plus haut, les modèles progressivement développés depuis des décennies permettent de conclure à l'influence très forte de la teneur en CO₂ atmosphérique sur le dérèglement climatique, en raison de sa très forte et rapide augmentation de teneur dans l'atmosphère et de sa durée de vie (un siècle +), une influence fortement amplifiée par la vapeur d'eau, principal gaz à effet de serre, à durée de vie courte mais sur laquelle l'homme

12. Voir réponse à question 6.

13. Voir chapitre 9 du rapport 2007 du GIEC.

n'a pas prise. Quant à l'idée d'une contribution majeure des émissions anthropiques à l'augmentation du CO₂ atmosphérique, elle n'est contestée par personne aujourd'hui.

Ne s'estimant pas en capacité de trancher entre causes naturelles et causes anthropiques dans son rapport 1990, le GIEC, dans son rapport 2001, considère que la majeure partie du réchauffement est d'origine anthropique, un diagnostic très clairement renforcé en 2007 puisque le GIEC considère alors qu'il y a plus de 9 chances sur 10 pour que ce soit le cas. Comme le rappelle Jean Jouzel (2010)¹⁴, ce résultat doit beaucoup aux deux types de simulations des modélisateurs du climat, le premier ne prenant en compte que l'évolution des forçages naturels (variabilité solaire et volcans), le second incluant également les forçages anthropiques (gaz à effet de serre et aérosols). Il s'avère impossible de reproduire le réchauffement observé depuis les années 1970 sans prendre en compte l'évolution des gaz à effet de serre. Et le GIEC de conclure : « nous sommes, presque certainement, dans un monde dont nous modifions le climat ».

Question 6

Les conséquences du réchauffement climatique sur l'élévation du niveau de la mer sont-elles une fiction ?

Les causes du relèvement du niveau des mers sont connues : dilatation liée à la lente pénétration de la chaleur dans l'intérieur des océans et fonte progressive des grands glaciers continentaux. Les modèles climatiques d'aujourd'hui ne prennent en compte ni la rétroaction de la fonte des glaciers de montagne sur le climat, ni les calottes polaires (Groenland et Antarctique) dont l'évolution sort de l'échelle de temps des modèles climatiques (voir question 1).

Le rapport 2007 du GIEC¹⁵, pour l'ensemble des scénarios du SRES fait état d'une fourchette d'élévation de 18 à 59 cm pour 2100, selon les scénarios retenus, avec une augmentation moyenne annuelle de 3,8 mm. Les mesures satellitaires du niveau marin depuis le milieu des années 90 invoquent une élévation de 3,3 mm/an¹⁶, soit 33 cm par siècle. La fourchette proposée par le GIEC n'a donc rien d'extraordinaire. Par ailleurs, l'évaluation du volume de grands glaciers par radar a montré que, sur les 2 ou 3 dernières années le Groenland perd de la masse et que la fonte correspondante expliquerait environ 20% du relèvement actuel du niveau de la mer. Selon le GIEC (2007), la fonte complète de la calotte du Groenland¹⁷ provoquerait une élévation de 7,3 m du niveau des mers, celle de l'Antarctique, de 56,6 m¹⁸, tous phénomènes qui ne sont, en tout état de cause, envisageables qu'à l'échelle de

plusieurs siècles, voire de millénaires.

N'oublions pas les mouvements isostatiques des « boucliers » anciens, naguère recouverts par les glaces, qui tendent à corriger localement l'élévation du niveau des mers. Ceci dit, les changements de niveau marin dans le passé sont tellement évidents pour un géologue qu'ils ne prêtent pas à discussion, mais leurs causes peuvent être très variées ; le climat en est une, la dilatation des océans une autre, et la tectonique, locale ou régionale, encore une.

Question 7

Le GIEC fonctionne par consensus scientifique et ferait fi des divergences, ce qui est contraire à une démarche scientifique correcte ?

Les critiques avancées portent sur les points suivants :

- trois organismes ont pignon sur rue au GIEC : Hadley Center, NASA et NOAA¹⁹. Quelques personnalités y auraient fait la pluie et le beau temps : outre Maurice Strong (ONU), Al Gore et Tony Blair avec son conseiller scientifique David King, des scientifiques comme James Hansen, Stephen Schneider, John Houghton... ont propagé abusivement des prévisions catastrophistes ;
- seule une minorité de scientifiques rédige les rapports ;
- la science progresse par les divergences entre scientifiques et non pas par le consensus et beaucoup de points de vue divergents n'ont pas été pris en compte. Aujourd'hui, les points de vue contestataires seraient les plus nombreux ;
- le GIEC a permis de justifier de nombreuses demandes (et d'obtentions) de crédits pour de nombreux laboratoires. On parle de 20 milliards de dollars sur 10 ans.

Le GIEC (Groupe Intergouvernemental d'Experts sur le Changement climatique) ne conduit pas de recherches, pas plus qu'il n'organise la recherche internationale, ni n'est directement responsable des financements qui lui sont alloués. On peut toutefois considérer qu'il joue un rôle indirect, dans l'orientation de la recherche, par les synthèses qu'il propose. Il formalise une synthèse régulière des connaissances dans trois domaines, qui correspondent à autant de groupes de travail : Fondements scientifiques du problème climatique (Groupe I), Impacts régionaux du climat sur le milieu physique, les écosystèmes, les sociétés (Groupe II) et Études socio-économiques - estimation de l'évolution des GES et du coût de leur réduction (Groupe III).

Le GIEC a produit 4 rapports (1990, 1995, 2001 et 2007), chacun comportant un rapport de chaque groupe et un rapport de synthèse. Il s'agit exclusivement d'un travail de rédaction, uniquement assuré par des bénévoles

14. Débats et controverses autour du réchauffement climatique. Annales des Mines. Responsabilité et Environnement. N° 59, spécial Après Copenhague, juillet 2010, 15-21.

15. Chapitre 5.5. Changes in sea level.

16. Diverses séries de mesures par marégraphes font état de $\pm < 1$ à 2 mm/an.

17. Surface 1,7 million de km², volume 2,9 millions de m³.

18. Surface 12,3 millions de km², volume 24,7 millions de m³.

19. On oublie l'Institut Pierre Simon Laplace des Sciences de l'Environnement (IPSE) qui est pourtant le mieux représenté dans les auteurs du groupe scientifique.

réunis pour la circonstance, abusivement qualifiés de membres du GIEC, et qui ne s'appuient que sur des articles parus. Chaque groupe de travail définit le plan de son rapport, la rédaction de chaque chapitre (une dizaine en général) étant confiée à une équipe d'une dizaine de rédacteurs principaux, dont deux jouent un rôle de coordination. Le texte initial est proposé à l'ensemble de la communauté scientifique, puis à des experts gouvernementaux. Les commentaires et critiques sont pris en compte dans le texte ou écartés, toujours sur la base d'un avis motivé, rendu public. Chaque rapport donne lieu à quatre itérations successives, garantissant qu'aucune source d'information publiée n'est ignorée. Des éditeurs scientifiques sont mis en place pour chaque chapitre avec pour seule mission de vérifier le respect de l'ensemble des règles adoptées. Il est à noter qu'après la parution du rapport général, les groupes de travail constituant le GIEC sont dissous.

Si l'on considère le rapport 2007 du groupe I, par exemple, sont intervenus 160 auteurs principaux et près de 600 scientifiques, en incluant éditeurs, contributeurs et relecteurs. Les trois types de résumés (techniques, pour les décideurs, ou de synthèse sur l'activité des trois groupes), phase délicate d'écriture, sont approuvés ligne par ligne en assemblée générale de tous les pays de l'ONU, par des experts gouvernementaux et selon une règle de consensus. C'est d'ailleurs en privilégiant une démarche collective et un consensus, que le GIEC est devenu la cible de tous les esprits climato-sceptiques. Cette recherche du consensus ne signifie en rien le rejet des idées nouvelles et de la créativité en vue de l'obtention d'un label officiel de l'ONU.

Au fil de ses quatre rapports, rédigés à 5-6 ans d'intervalle, le GIEC s'est efforcé de prendre en compte les développements scientifiques intervenus dans l'intervalle, dans le double objectif de proposer une mise au point des connaissances partagée et de faire des propositions pour l'avenir, en évitant les excès tout à la fois de prudence excessive ou de catastrophisme.

Question 8

Le documentaire « An inconvenient truth » (une vérité qui dérange) réalisé par David Guggenheim et dont Al Gore est acteur et orateur, est-il marqué de contre-vérités scientifiques ?

Selon les critiques, ce film témoigne d'une propagande éhontée pour une perspective catastrophique. Il est truffé d'erreurs et c'est un scandale qu'il ait reçu le prix Nobel de la paix. En outre, le film sert les propres intérêts économiques d'Al Gore et des sociétés où il intervient.

Il est exact que la valeur de ce film est mise en

cause par des erreurs scientifiques ou des extrapolations abusives. En Grande Bretagne, suite à l'interpellation du Gouvernement par un directeur d'école, un jugement d'octobre 2007 impose une modification du guide de diffusion pour les enseignants (« *Guidance Notes to Teachers* ») en précisant que le film est une œuvre politique ne montrant qu'un seul point de vue, que les enseignants qui ne le signalent pas clairement peuvent se trouver en violation de la loi (section 406, Education Act 199) et que 11 inexactitudes²⁰, en particulier, doivent être portées à l'attention des enfants des écoles.

Ces inexactitudes sont : 1) la fonte des neiges au Mont Kilimandjaro est une preuve du réchauffement climatique, 2) les données des calottes glaciaires prouvent que l'augmentation du CO₂ a entraîné une hausse des températures sur 650 000 ans, 3) le réchauffement climatique est la cause de l'ouragan Katrina, 4) le réchauffement climatique est à l'origine de l'assèchement du Lac Tchad, 5) des ours polaires se sont noyés à cause de la fonte des glaces arctiques, 6) le réchauffement climatique pourrait stopper le Gulf Stream et renvoyer l'Europe à l'âge de glace, 7) le réchauffement climatique est à l'origine de la disparition d'espèces, dont le blanchissement des récifs coralliens, 8) la calotte de glace du Groenland pourrait fondre et entraîner une hausse alarmante du niveau des mers, 9) la calotte antarctique est en train de fondre, 10) le niveau des mers pourrait augmenter de 7 mètres, entraînant le déplacement de millions de personnes, 11) la hausse du niveau des mers a causé l'évacuation de certaines îles du Pacifique en direction de la Nouvelle Zélande.

Le prix Nobel octroyé à ce film, aux côtés du GIEC, a été justifié dans l'esprit d'un message d'alerte envoyé à l'humanité, ce qui n'a pas été finalement bénéfique au GIEC dont la vocation principale est de proposer des synthèses de résultats scientifiques.

Par ailleurs, il semble exact qu'Al Gore se soit servi de son film à la fois comme message d'alerte général, relativisant de fait les erreurs qui y sont présentes, et aussi à des fins personnelles, comme pionnier du « Green Business » au travers de divers fonds d'investissement. Mais c'est son problème (sauf pour le Nobel) et pas celui du GIEC.

Question 9

Le réchauffement climatique est devenu un outil de propagande d'un scénario catastrophiste, au détriment d'autres priorités ?

Ceux qui émettent ces critiques évoquent les points suivants :

- on ne parle plus que du réchauffement climatique, en

20. Ce ne sont pas forcément toujours des inexactitudes, mais parfois des approximations.

oublant la croissance démographique, les besoins en eau et en alimentation, la sécheresse, les inondations, etc. ;

- le réchauffement climatique est devenu un outil politique, à l'échelle internationale (ONU, experts gouvernementaux intervenant au sein du GIEC) ou nationale, par exemple pour le Grenelle de l'environnement en France ;
- on profite du réchauffement climatique pour demander aux pays en développement de faire des efforts, efforts que les pays développés n'ont pas fait en leur temps, alors que leur priorité est au développement. C'est une attitude très contestable ;
- on invoque abusivement le réchauffement climatique comme responsable de toutes sortes d'événements : un cyclone par ci, une sécheresse par là, une inondation ailleurs, etc.

Il faut distinguer le travail du GIEC à vocation de synthèse scientifique au premier chef et de recommandations d'action en second lieu, de tous les usages et dérives qui peuvent en résulter. Le GIEC n'a aucune responsabilité directe, ni dans le choix des recherches scientifiques menées, ni dans les politiques qui peuvent être tirées de l'état des lieux qu'à travers ses rapports, le GIEC fait sur les différents aspects liés à l'influence des activités humaines sur le climat (la mission du GIEC est de porter un diagnostic). Le choix de mettre la priorité sur l'eau, la croissance démographique ou l'alimentation est un choix politique local, régional, national ou international, qui est totalement indépendant du GIEC, de même que la pression « abusive » mise sur les pays en développement.

La croissance démographique galopante est le facteur-clé, cause à la fois des problèmes d'eau, de pollution en tous genres, y compris atmosphérique, d'alimentation, etc. La mise en cause du réchauffement climatique pour toutes sortes de situations locales est une façon commode de se trouver un bouc émissaire et les médias ne se privent pas de l'invoquer. Sur le plan scientifique ou technique, on sait très bien que l'enfoncement d'îles volcaniques et de certains deltas, ou l'impact de cyclones comme Katrina (un cyclone parmi un grand nombre d'autres) ne sont nullement en corrélation directe avec le réchauffement climatique.

Question 10

L'action sur le climat est une illusion, il faut s'adapter

Les critiques peuvent être formulées comme suit :

- la réduction des émissions de GES est une illusion. Depuis Kyoto l'impact de ce qui a été réalisé est négligeable. Sans parler du commerce des droits à polluer dont le fonctionnement actuel est discutable ;

- les coûts afférents à la réduction des émissions sont disproportionnés ;
- certains pays en développement (Chine, Inde...) sont venus rejoindre le cortège des grands pollueurs occidentaux ;
- la solution réside dans l'innovation et les solutions alternatives pour faire face au réchauffement climatique.

La responsabilité du GIEC est d'avoir tiré la sonnette d'alarme sur l'impact potentiel de l'augmentation des GES dans l'atmosphère, augmentation largement due aux activités humaines depuis un certain nombre de décennies. La réduction des émissions, même organisée internationalement, repose sur la volonté des États individuels, ou regroupés comme dans l'Union européenne par exemple. Le stockage souterrain (séquestration) de CO₂ fait partie des solutions, mais ne résoudra qu'une partie du problème. Il faut donc agir conjointement sur plusieurs volets et l'adaptation au travers de solutions innovantes fait partie des voies de recherche.

Il est clair que toutes les solutions innovantes, durables, sont les bienvenues, d'autant qu'en parallèle on se trouve dans la courbe descendante des réserves en hydrocarbures pour le siècle à venir alors que la demande en énergie poursuit sa croissance. Cette diminution des réserves est certainement une des contraintes les plus fortes au regard de la menace du réchauffement climatique, même si on augmente massivement l'utilisation du charbon dont les réserves sont estimées suffisantes pour des siècles !

Question 11

La courbe de température en « crosse de hockey » pour le dernier millénaire est-elle un faux ?

Les critiques formulées portent sur les points suivants :

- la courbe ne tient pas compte des évolutions historiques connues : optimum chaud du Moyen Âge, Petit Âge glaciaire, alors que la courbe historique en tient compte (voir rapport 1 du GIEC) ;
- elle s'appuie sur un traitement statistique erroné (analyse non conventionnelle en composantes principales) : courbes de Michael E. Mann assisté de Raymond S. Bradley et Malcolm K. Hughes. Erreur démontrée par les contrôles statistiques de Steve McIntyre, Ross McKittrick, puis Edward J. Wegman²¹ ;
- elle s'appuie sur une surpondération de certaines données dendrochronologiques (pins de Bristlecone, *Pinus longaeva*). En outre, les anneaux de croissance se rétrécissent depuis 1970 alors même que les températures augmentent ;
- les données de température disponibles avant le milieu de XIX^e siècle sont très insuffisantes. Elles ne permettent

21. Le rapport de l'Académie des Sciences a, au contraire, apporté son soutien à Mann, soutien certes critique qui fait état d'incertitudes mais limitées à 5/100^{ème} de degré.

pas d'établir une courbe de température moyenne, surtout à 0,1° près, d'autant que, avant 1950, les données dont on dispose sont surtout dans l'hémisphère Nord et en milieu urbain ;

- en tout état de cause, les interrogations suscitées par cette courbe peuvent susciter des interrogations sur la qualité des travaux menés en climatologie et les réponses données à divers questionnements : rôle de la vapeur d'eau, qualité des modélisations, relation de cause à effet entre température et teneur en CO₂, importance relative du rayonnement solaire et du rôle des gaz à effet de serre (GES).

Au niveau de la courbe en crosse de hockey elle-même, la critique de non reproductibilité de la courbe de Mann exprimée par McIntyre et McKiltrick (2003) a été réfutée par Wahl et Amman (2006) qui ont clairement reproduit les résultats à condition d'utiliser le protocole original de prise en compte des données. Une autre mise en cause de McIntyre et McKiltrick (2005) portait sur la comparaison avec les données instrumentales disponibles et la dominance des dendrochronologies nord-américaines traitées par analyse en composantes principales. Wahl et Amman n'ont pas contesté le fondement théorique de cette critique mais ont montré que l'impact sur les

reconstructions finales était réduit.

Quoiqu'il en soit, la courbe a été revue depuis sa première publication en 1998-99 et, comme l'indique le rapport 2007 du GIEC²², un certain nombre d'autres courbes ont vu le jour depuis, basées sur des résultats terrestres ou une combinaison de résultats terrestres et marins (surface de l'océan), qui toutes restent dans la marge d'erreur de la courbe initiale. Les incertitudes proviennent essentiellement d'une couverture spatiale incomplète à travers le temps. Elles sont plus importantes au XIX^e siècle comparé au XX^e, mais la prééminence du réchauffement récent des 2 ou 3 dernières décennies apparaît clairement dans cette évolution sur 150 ans. En outre, à l'échelle de temps de la reconstitution, des inflexions marquent l'optimum médiéval et le Petit Âge glaciaire, dont on pourra toujours discuter sans fin du niveau de généralisation possible au-delà des mesures locales. En outre, cela ne change pas l'accent mis sur la montée très forte de température depuis 150 ans et surtout depuis quelques décennies. Pour le GIEC, il y a deux chances sur 3 pour que le réchauffement des 50 dernières années soit unique en son genre sur la durée du dernier millénaire, ce qui laisse néanmoins une chance sur trois pour que l'on ne puisse pas conclure dans ce sens.