

Réchauffement climatique : attribution et recherche des causes

C'est la conclusion du dernier rapport du Giec : l'essentiel de l'accroissement de la température moyenne globale depuis le milieu du XX^e siècle résulte, pour l'essentiel, de l'augmentation des gaz à effet de serre anthropiques. Une affirmation qui repose sur un lent processus de démonstration qui confronte résultats de simulations climatiques et observations. La multiplication des analyses statistiques pour détecter des signaux de changement climatique et les attribuer à différentes sources de variabilité, d'origine naturelle ou anthropique, a renforcé la conviction des experts. Les études récentes menées en France permettent elles aussi de conclure à une contribution anthropique et d'ouvrir de nouvelles pistes : en termes d'impacts régionaux du changement climatique mais, aussi, en termes de validation des outils de modélisation utilisés pour les projections du climat futur.

par Serge PLANTON, *Météo-France, Centre national de recherches météorologiques*

La réalité d'un réchauffement climatique est aujourd'hui considérée comme incontestable par la communauté scientifique réunie au sein du Giec. Depuis le début du XX^e siècle, le réchauffement moyen à la surface de la planète est estimé entre environ 0,6° et 0,9°, en tenant compte des différentes sources d'incertitudes inhérentes à ce type d'estimation. Le réchauffement climatique est confirmé par l'analyse de données satellitaires permettant, et c'est un fait nouveau, de mettre en évidence un réchauffement de la basse atmosphère sur les trois dernières décennies compatible avec le réchauffement de la surface. Il est aussi confirmé par le constat de changements récents dans ce qu'il est convenu d'appeler les autres composantes du système climatique (atmosphère, hydrosphère (1), cryosphère (2), biosphère et surfaces continentales), avec notamment un réchauffement des premières centaines de mètres des océans, une montée du niveau marin, un retrait quasi généralisé des glaciers de montagne ou, encore, une diminution de la couverture de neige, notamment au printemps. A l'échelle de la France, un réchauffement moyen de l'ordre du degré depuis le début du XX^e siècle, et différents indicateurs indirects comme la perte de masse de glaciers alpins ou l'avancement des dates de floraison d'arbres fruitiers pour ne citer que quelques exemples, traduisent régionalement cette réalité planétaire.

Les simulations effectuées avec les modèles climatiques permettent aujourd'hui au Giec d'affirmer aussi que le réchauffement climatique sera très probablement plus élevé au cours du XXI^e siècle qu'au XX^e, si les émissions des gaz à effet de serre se poursuivent au moins au rythme actuel. Un constat qui se fonde sur la prise en compte, par ces modèles, des propriétés des principaux gaz à effet de

serre (vapeur d'eau, dioxyde de carbone, méthane, protoxyde d'azote...) qui interagissent avec le rayonnement : relativement transparents au rayonnement solaire incident mais interceptant le rayonnement infrarouge émis par la surface terrestre. Cet effet est connu depuis plus d'un siècle mais l'évaluation de son importance sur l'évolution du climat futur, en liaison avec l'évolution de nos sociétés et de la démographie, n'est possible que depuis quelques décennies (voir l'article de Michel Déqué). Mais si la conviction de la nécessité de prendre en compte le mécanisme de l'effet de serre pour évaluer le réchauffement climatique à venir s'est rapidement répandue au sein de la communauté climatique dès les premières projections réalisées, la reconnaissance de son rôle dominant sur le réchauffement climatique déjà observé a pris plus de temps.

Pourtant, l'augmentation des concentrations de dioxyde de carbone atmosphérique, et son origine anthropique sont connues depuis les années 1960, comme l'était la tendance au réchauffement depuis le début du siècle. Mais ce n'est évidemment pas la corrélation entre ces deux observations, même éclairée par la connaissance d'un potentiel mécanisme sous-jacent, qui a permis d'établir la conviction d'un lien de cause à effet. Ce n'est pas non plus la corrélation établie entre les concentrations de gaz à effet de serre et la température à partir des données de carottages glaciaires sur des échelles de temps de plusieurs millénaires à plusieurs centaines de milliers d'années. C'est au terme d'un processus de démonstration relativement lent que les experts ont élaboré la conclusion du dernier rapport du Giec, laissant maintenant peu de place au doute quant au rôle prépondérant de l'homme dans le changement climatique récent. Ils concluent, en



© USGS/STILL PICTURES/BIOS

La fonte accélérée des glaciers du Groenland confirme la réalité du réchauffement climatique désormais admise par la communauté scientifique. Ici le glacier Tobbogan photographié en 1906 par la mission John Muir...

effet, que l'essentiel de l'accroissement constaté de la température moyenne globale depuis le milieu du XX^e siècle, est très probablement (probabilité supérieure à 90 %) dû à l'augmentation observée des concentrations des gaz à effet de serre d'origine humaine.

Un bref historique de la détection et de l'attribution

Les rapports successifs du Giec reflètent la maturation des idées sur la question de l'attribution du changement climatique récent. Le réchauffement climatique et l'augmentation de la concentration du dioxyde de carbone depuis le milieu du XX^e siècle étaient déjà constatés dans le premier rapport, en 1990. Mais ce rapport concluait que le changement climatique observé pouvait être principalement d'origine naturelle. Dans un supplément à ce premier rapport, publié en 1992, les auteurs précisait même qu'une détection univoque d'une accentuation de l'effet de serre dans les observations, ne pourrait probablement pas être effectuée avant une décennie. Ce pronostic s'est finalement avéré assez précis.

Le deuxième rapport, publié en 1995, faisait état d'une influence discernable des activités humaines sur le climat. Cette conclusion nouvelle est essentiellement le fruit de la confrontation entre les résultats de simulations de changements de température à grande échelle et les observations correspondantes. La publication du rapport avait été effectivement précédée d'une avancée d'importance : l'évaluation par les modèles climatiques de l'impact des particules en suspension dans l'atmosphère résultant des activités humaines (en l'occurrence les aérosols sulfatés) sur l'évolution des températures. La prise en compte de l'effet de refroidissement des aérosols, se combinant avec l'effet de réchauffement de plus forte amplitude lié à l'augmentation de la concentration des gaz à effet de serre, a ainsi rendu possible le succès de la confrontation modèles/données.

Pour la première fois, ce même rapport rendait compte d'études de détection et attribution du changement climatique, aujourd'hui qualifiées de « formelles », fondées sur des techniques statistiques évoluées. La méthode employée, dite « des empreintes digitales », consiste à rechercher un signal de changement anthropique dans les

observations, caractérisé par une répartition géographique, et souvent aussi une évolution temporelle, déduites de simulations climatiques. Dans le cas de la détection, ce signal est testé statistiquement par rapport au bruit de la variabilité climatique interne, c'est-à-dire la variabilité qui se manifeste en l'absence de tout forçage externe au système (naturel, comme la variabilité solaire et le volcanisme, ou anthropique avec les émissions de gaz à effet de serre et de sources d'aérosols). Dans le cas de l'attribution, l'objectif est de trouver quelle est la meilleure combinaison de l'ensemble des forçages, naturels et anthropiques, qui explique les observations et leur évolution récente. Cette technique s'apparente à une méthode de régression généralisée dans laquelle on reconstruit les observations à partir d'une combinaison pondérée des différents forçages et du bruit de la variabilité climatique interne. Ici aussi, la qualité de la reconstruction est testée statistiquement.

La multiplication de ce type d'études aux conclusions cohérentes, alliée à une meilleure caractérisation des effets climatiques des différents forçages et du bruit de la variabilité climatique interne, avait amené le Giec à sa

conclusion du troisième rapport (2001), rendant probable (probabilité supérieure à 66 %) un effet prépondérant de l'activité humaine sur le réchauffement des 50 dernières années du XX^e siècle [1]. De nouveaux éléments, récemment publiés, sont venus renforcer la confiance accordée par les experts à cette affirmation.

Les derniers résultats

L'une des premières conclusions importantes des études de détection et d'attribution « formelles » les plus récentes, est que les gaz à effet de serre seuls ont probablement induit un réchauffement sur la deuxième moitié du XX^e siècle supérieur au réchauffement effectivement observé. Ce réchauffement aurait été limité par l'effet de refroidissement dû à l'augmentation de la concentration des aérosols et aux forçages naturels (variabilité solaire et volcanisme). Certaines études ont aussi montré que le réchauffement anthropique serait supérieur au réchauffement observé sur l'ensemble du XX^e siècle. Une étude très récente effectuée à partir de trois modèles climatiques différents montre ainsi que le réchauffement attribuable



... et le même en 2000.

© Bruce Molnia USGS/STILL PICTURES/BIOS

aux seuls gaz à effet de serre émis par les activités humaines serait, pour le XX^e siècle, compris entre 0,7° et 1,3° mais masqué, en partie, par un refroidissement lié à l'effet climatique des aérosols, compris entre 0,3 et 0,5° [2]. La contribution des forçages naturels s'avère très faible selon cette étude, avec une contribution de plus ou moins 0,1° à la tendance réelle observée, comprise entre 0,4° et 0,8° sur le siècle.

Il est par ailleurs très improbable que le réchauffement de la deuxième moitié du XX^e siècle puisse s'expliquer par la seule variabilité interne du système climatique, sans cause externe d'origine naturelle ou anthropique. La variabilité interne du climat n'est pas directement mesurable dans la mesure où ce que l'on observe résulte de la combinaison de toutes les sources de variabilité climatique qu'elles soient internes ou externes. Elle est estimée à partir de simulations de modèles climatiques couvrant plusieurs centaines d'années, avec des facteurs externes d'évolution du climat maintenus constants (rayonnement solaire au sommet de l'atmosphère, volcanisme, concentrations des gaz à effet de serre et des aérosols...). Selon une analyse conduite récemment, la détection d'un signal de réchauffement d'origine anthropique reste cependant possible même si cette variabilité était sous-estimée d'un facteur proche de 5 [3].

La question de la contribution spécifique de la variabilité solaire a aussi été largement étudiée au cours de ces dernières années. En l'absence d'observation directe du rayonnement solaire incident au sommet de l'atmosphère avant la période d'observations satellitaires, celle-ci doit être estimée à partir de différents indicateurs indirects comme le nombre de tâches solaires, et au travers de modèles de simulation. Les estimations peuvent, dès lors, différer fortement entre elles. Une étude de 2003 portant sur deux reconstructions de la variabilité solaire, a montré que le forçage solaire pourrait dominer le changement climatique de la première moitié du XX^e siècle mais que sur la seconde, en conformité avec les conclusions précédentes, c'est bien le forçage dû aux émissions anthropiques de gaz à effet de serre qui domine. À noter que les résultats restent valables dans l'hypothèse d'une sous-estimation, par les modèles climatiques, de l'amplitude du signal dû à la variabilité solaire qui serait expliquée par la non prise en compte d'un éventuel processus d'amplification [4]. D'autres études accordent, au contraire, un moindre rôle à la variabilité solaire, y compris sur la première moitié du XX^e siècle : c'est le cas d'une étude très récente qui conclut que la contribution de la variabilité solaire sur cette période ne dépasserait pas le quart du réchauffement observé, explicable par ailleurs par une combinaison des effets du volcanisme, de la variabilité interne du climat et de l'augmentation de la concentration des gaz à effet de serre qui représente environ le tiers de la tendance sur la période [5]. Cette disparité de résultats illustre toute la difficulté d'une attribution des causes du réchauffement sur la première partie du XX^e siècle, en raison de l'incertitude sur la variabilité solaire reconstruite mais, aussi,

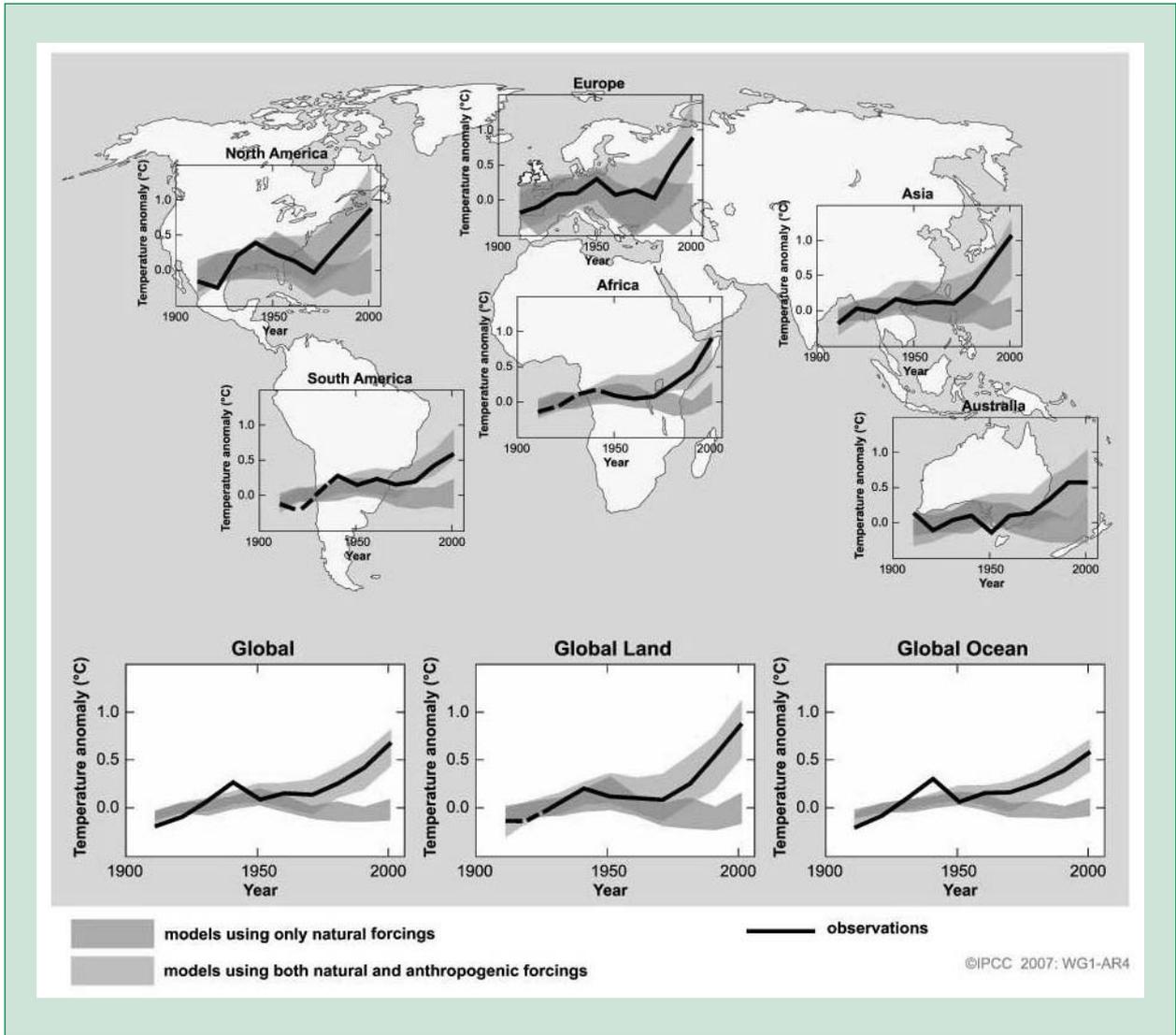
de la relative faiblesse du signal anthropique sur cette période.

L'expertise du Giec s'est aussi nourrie de nouvelles études de détection et d'attribution, mettant en évidence un signal anthropique dans l'évolution récente d'autres paramètres que la température près de la surface. C'est le cas, notamment, pour l'évolution du profil vertical de température atmosphérique dont la répartition géographique et l'historique mettent en évidence l'influence très probable du forçage anthropique incluant les émissions de gaz à effet de serre mais, aussi, la diminution de l'ozone stratosphérique. Il est par ailleurs probable que les activités humaines ont contribué au réchauffement des premières centaines de mètres des océans et à l'augmentation de leur niveau, même si l'amplitude de cette contribution est difficile à déterminer. Il en est de même pour certains changements de circulation se manifestant sur la pression de surface. Pour d'autres observations, on peut en dire qu'elles sont cohérentes avec un impact attendu des activités humaines, sans que l'attribution anthropique puisse en être démontrée en utilisant les méthodes statistiques « formelles » évoquées plus haut. C'est notamment le cas pour le changement de précipitations continentales moyen suivant la latitude.

Une étape importante a enfin été franchie récemment avec la mise en évidence d'un impact anthropique, toujours sur la température près de la surface, mais à une échelle spatiale bien plus fine que dans les études antérieures. En effet, les simulations qui prennent à la fois en compte les forçages climatiques naturels et anthropiques sont beaucoup plus en accord avec les changements de température continentaux observés que les simulations ne prenant en compte que les forçages naturels (voir figure). En appliquant les méthodes statistiques « formelles », le réchauffement d'origine anthropique a été détecté sur tous les continents, excepté l'Antarctique en raison d'une couverture insuffisante des observations. D'après une étude consacrée à cette question, cette détection reste même possible lorsque la variabilité interne du climat est multipliée par un facteur 2 [6]. Une détection à une échelle qu'il est convenu d'appeler sous-continentale est, par contre, beaucoup plus difficile en raison de l'importance de la variabilité climatique interne et des incertitudes sur les réponses aux différents forçages naturels ou anthropiques simulées par les modèles climatiques. Quelques tentatives de détection, et même d'attribution, des changements climatiques à ces échelles ont cependant pu être réalisées avec succès, notamment par des équipes françaises.

Le cas de la France

Un premier résultat, voici quelques années, a permis la mise en évidence d'un signal d'origine anthropique dans les observations des tendances sur 30 ans des températures nocturnes d'été. Comme pour toute étude de détection utilisant la méthode statistique « formelle », le point de départ de cette étude est un jeu de données homogènes



Changements de température relatifs à la moyenne de la période 1901-1950 (°C), de décennie en décennie de 1906 à 2005 sur les continents, et sur le globe, les surfaces continentales et l'ensemble des océans (figures du bas). Le trait noir correspond aux changements de température observés et les plages grisées représentent le domaine couvert par 90 % des résultats d'un ensemble de simulations climatiques récentes. La zone gris clair correspond à des simulations qui incluent à la fois des facteurs anthropiques et naturels de changements de température, la zone gris foncé se réfère quant à elle à des simulations ne prenant en compte que les facteurs naturels. Le trait hachuré noir indique des décennies et des continents pour lesquels on dispose de très peu d'observations. (Figure extraite de [1])

couvrant une période de temps longue, des simulations de la réponse du climat aux forçages anthropiques et une estimation de la variabilité interne du climat. Les données utilisées sont constituées d'un ensemble de 70 séries centennales de températures, réparties sur l'ensemble du territoire et corrigées des effets liés aux changements de lieu d'observation, de capteurs... Les simulations du signal anthropique sont, quant à elles, issues de l'intégration d'un modèle climatique régional (Arpege-Climat) permettant de décrire de manière plus fine les changements climatiques dans le domaine méditerranéen (un point de calcul tous les 60 km environ, au lieu d'un point tous les 250 à 300 km avec les modèles climatiques classiques) prenant en compte les changements de gaz à effet de serre et d'aérosols sulfatés. Pour cette étude, la variabilité clima-

tique interne est directement estimée à partir des séries centennales. Si la détection d'un signal anthropique sur les températures nocturnes d'été s'avère positive, la moindre amplitude des signaux, mais, surtout, les incertitudes des simulations, ne permettent pas de détecter un signal anthropique sur les températures estivales diurnes ou hivernales [7].

Très récemment, une étude d'attribution des changements de températures nocturnes d'été sur la période 1950-1999 est venue confirmer l'origine pour partie anthropique de ces changements. L'étude s'appuie sur les mêmes données mais sur un ensemble beaucoup plus large de simulations effectuées avec le modèle climatique régional afin de distinguer les signaux de changement dus à différentes sources naturelles ou anthropiques. A titre

d'exemple, l'un des résultats permet de montrer que le réchauffement moyen de la dernière décennie du siècle s'explique, pour près de la moitié, par l'influence océanique majoritairement liée au réchauffement global et, pour un quart supplémentaire, directement par les effets des gaz à effet de serre et des aérosols d'origine anthropique [8].

Une analyse des mécanismes expliquant les changements de températures simulés par le modèle climatique a permis de proposer une interprétation physique à la détection du signal anthropique. Il pourrait s'agir d'un phénomène d'amplification du réchauffement dans les régions les plus sèches conduisant à une distribution géographique du réchauffement dépendante de l'humidité des sols. Une corrélation significative entre des humidités des sols reconstituées à partir d'observations météorologiques et les humidités calculées par le modèle corrobore cette hypothèse, permettant ainsi de renforcer la crédibilité de la détection [8].

Enfin, de premières analyses ont été faites concernant la détection de signaux de changement sur les précipitations. Il est ainsi possible de détecter un signal anthropique dans la répartition spatiale des précipitations hivernales. Il est aussi possible de mettre en évidence une influence anthropique dans les changements des fréquences d'occurrence des régimes de temps qui conditionnent les précipitations hivernales à l'échelle de la France [8]. Ce sont donc de nouvelles pistes qui ont été ouvertes aux études de détection et d'attribution qui restaient jusqu'ici, pour l'essentiel, cantonnées à l'analyse de signaux de grande échelle. C'est important en termes d'impacts régionaux du changement climatique, mais aussi en termes de validation des outils de modélisation utilisés pour les projections du climat futur.

Bibliographie

- [1] Hegerl, G.C., *et al.* : Understanding and attributing climate change. In : « *Climate change 2007 : the physical science basis* ». Contribution of working group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, pp. 665-745, 2007.
- [2] Stott, A. P., *et al.* : Observational constraints on past attributable warming and predictions of future global warming. *Journal of Climate*, n° 19, pp. 3055-3069, 2006.
- [3] Tett, S. F. B., *et al.* : Estimation of natural and anthropogenic contributions to twentieth century temperature change. *Journal of Geophysical Research*, n° 107 (D16), 4306, 2002.
- [4] Stott, A. P., *et al.* : Do model underestimate the solar contribution to recent climate change ? *Journal of Climate*, n° 16, pp. 4079-4093, 2003.
- [5] Hegerl, G. C., *et al.* : Detection of human influence on a new, validated 1500-year temperature reconstruction. *Journal of Climate*, n° 20, pp. 650-666, 2007.
- [6] Zhang, X., *et al.* : Multimodel multisignal climate change detection at the regional scale. *Journal of Climate*, n° 19, pp. 4294-4301, 2006.
- [7] Spagnoli, B., *et al.* : Detecting climate change at the regional scale : the case of France. *Geophysical Research Letter*, n° 29 (10), pp. 90-1, 90-4, 2002.
- [8] Planton, S., et L. Terray : Détection et attribution à l'échelle régionale : le cas de la France. « Livre blanc » Escrime (Etude des Scénarios Climatiques Réalisés par l'Ipsl et Météo-francE), www.insu.cnrs.fr/pj/document/944.pdf, pp. 61-68, 2007.

Notes

- (1) Formée de l'eau liquide à la surface de la terre : océans, mers, lacs...
- (2) Formée de l'eau solide à la surface de la terre : calottes polaires, banquise, neige...