



INSTITUT DE FRANCE
Académie des sciences

LE CHANGEMENT CLIMATIQUE

*

* *

Jean-Loup PUGET, Délégué de la section des sciences de l'univers, Rapporteur

René BLANCHET, Président du groupe « Climat » du Comité de l'environnement, Rapporteur

Jean SALENÇON, Président de l'Académie des sciences

Alain CARPENTIER, Vice-président de l'Académie des sciences

Coordination éditoriale : Jean-Yves CHAPRON

Le présent rapport est une synthèse des interventions et discussions prononcées lors du débat sur le climat le 20 septembre 2010 à l'Académie des sciences, des contributions écrites qui l'ont précédé et des nombreux échanges et commentaires qui l'ont suivi.

26 octobre 2010

Académie des sciences

Le changement climatique

26 octobre 2010

Depuis des millénaires, le climat de la Terre varie selon les époques et les lieux. Les changements observés s'étalent généralement sur des longues périodes qui atténuent la perception que l'homme peut en avoir à un moment donné. Au cours des dernières décennies cependant, les changements climatiques semblent s'être accélérés. Dans ces conditions, il n'est pas surprenant que le public s'interroge sur la réalité de ces changements, leurs causes, leur devenir et, plus encore, leurs conséquences immédiates et lointaines sur les modes de vie, la santé, les écosystèmes et l'économie. À ces questions, la Science peut tenter d'apporter des réponses autorisées, même si elles ne sont que partielles ou temporaires, dès lors qu'elles sont guidées par le souci d'objectivité qui doit présider à toute démarche scientifique. C'est dans ce contexte que la Ministre de l'Enseignement supérieur et de la Recherche s'est tournée vers l'Académie des sciences pour qu'elle organise un débat scientifique, afin de faire le point des connaissances actuelles sur ce sujet.

Le débat, ouvert à quelque 120 scientifiques français ou étrangers, dont des spécialistes extérieurs à l'Académie, a été organisé sous forme de contributions écrites suivies d'un débat oral qui a eu lieu le 20 septembre 2010. La diversité des disciplines représentées – mathématiques, physique, mécanique, sciences de l'univers, chimie, biologie et sciences médicales – reflète la complexité du sujet et la volonté de l'Académie de placer cette manifestation sous le signe de l'interdisciplinarité. Le débat, très riche et de haute tenue scientifique a porté sur les méthodes de prévisions climatiques ; il a permis de confronter les différents points de vue, de dégager des points de convergence et d'identifier les divergences et incertitudes qui persistent. Il est le point de départ d'une réflexion qui sera prolongée ultérieurement.

Malgré les nouveaux outils d'investigations dont on dispose aujourd'hui et malgré le volume considérable de données accumulées ces vingt dernières années, il faut souligner que la Science ne peut répondre à tout, qu'elle procède par étapes et qu'elle ne peut fournir à un moment donné que l'interprétation de faits avérés et des prévisions.

1. IMPORTANCE DES OBSERVATIONS POUR L'HISTOIRE RÉCENTE

L'analyse de l'évolution du climat impose de disposer d'observations globales de toutes les composantes du système climatique (atmosphère, océans, terres émergées et glaces), sur de longues périodes.

C'est seulement depuis le milieu des années 1970 que les programmes d'observations par satellites, complétés par des systèmes d'observation *in situ*, permettent d'obtenir des ensembles de données climatiques échantillonnées régulièrement dans l'espace et le temps. Pour les décennies antérieures, les données, plus partielles, font l'objet de retraitements dans le cadre d'une coordination internationale pour les rendre homogènes en tenant compte des changements d'instrumentation ou d'environnement immédiat.

La libre mise à disposition des données est une recommandation unanime, même si la forme qu'elle doit prendre est débattue. La majorité des chercheurs, en climatologie comme dans d'autres disciplines des sciences de l'univers, recommande la distribution des données après que les spécialistes les ont étalonnées et en ont retiré les effets instrumentaux ou d'environnement. Certains demandent aussi la mise à disposition des données brutes.

De l'ensemble des données, on peut dégager les indicateurs du changement climatique, les facteurs de son évolution et les éléments permettant de fonder l'étude des climats du passé.

1.1. LES INDICATEURS DE L'ÉVOLUTION CLIMATIQUE

1. **L'augmentation de la température de surface sur la Terre** est de $0,8 \pm 0,2$ °C depuis 1870¹. Elle reste notablement différente pour les deux hémisphères : plus forte au Nord et plus forte aux hautes latitudes. Une variabilité entre continents est également observée. Enfin, une forte modulation sur des périodes annuelles et multidécennales est également constatée, avec deux périodes de plus forte augmentation (approximativement de 1910 à 1940 et de 1975 à 2000) encadrées par des périodes de stagnation ou de décroissance. Les variations climatiques naturelles (El Niño, éruptions volcaniques, Oscillation Nord-Atlantique) y sont visibles.
2. **La température des océans**, mesurée depuis les années 1950 par les bateaux de commerce ou les navires océanographiques (jusque vers 700 m de profondeur) et plus récemment par le système de bouées profilantes Argo, montre une augmentation moyenne globale depuis quelques décennies. Le contenu d'énergie thermique de l'océan a donc aussi augmenté, surtout depuis le début des années 1980. Ce réchauffement n'est

¹ Augmentation, lissée dans le temps, de la température moyenne sur la surface de la Terre.

pas uniforme. Il présente une importante variabilité régionale avec d'importantes oscillations pluriannuelles, voire décennales.

3. **La réduction de la surface des glaces océaniques arctiques.** La banquise, dont la fonte ne contribue pas à l'élévation du niveau des océans, est un autre indicateur fort de l'accélération de l'évolution du climat : de 8,5 millions de km² stable dans la période 1950-1975, la surface des glaces de mer a connu une décroissance très rapide jusqu'à 5,5 millions de km² en 2010.
4. **Le recul des glaciers continentaux** est observé de façon quasi généralisée depuis 3 à 4 décennies, avec une nette augmentation au cours des 20 dernières années.
5. **Les calottes polaires de l'Antarctique et du Groenland** ont un bilan total de masse négatif depuis une dizaine d'années. Si quelques régions élevées de l'intérieur des calottes, en particulier Antarctique, s'épaississent un peu par suite de précipitations neigeuses accrues, la perte de masse domine. Celle-ci s'effectue dans les zones côtières du Groenland et de l'Antarctique de l'Ouest par écoulement très rapide de certains glaciers vers l'océan et décharge d'icebergs. On pense que le réchauffement des eaux océaniques dans ces régions est la cause majeure des instabilités dynamiques observées.
6. **Le niveau moyen des océans** est un autre indicateur qui intègre les effets de plusieurs composantes du système climatique (océan, glaces continentales, eaux continentales). Avant 1992, le niveau de la mer était mesuré par des marégraphes le long des côtes continentales et de quelques îles : le niveau des océans, en moyenne annuelle sur toute la planète, s'est élevé à un rythme de 0,7 mm/an entre 1870 et 1930 et d'environ 1,7 mm/an après 1930. Depuis 1992, les mesures sont effectuées par satellites : la hausse du niveau moyen global de la mer est de l'ordre de 3,4 mm/an. À cette élévation moyenne se superposent des oscillations pluriannuelle, liées à la variabilité naturelle du système climatique. Depuis le début des années 1990, les contributions climatiques à cette élévation sont approximativement dues, pour un tiers à la dilatation de l'océan consécutive au réchauffement et, pour les deux autres tiers, aux glaces continentales - à parts quasi égales, fonte des calottes polaires du Groenland et de l'Antarctique d'une part, et fonte des glaciers continentaux d'autre part.
7. **Les indicateurs biologiques**, tels que les déplacements de populations animales terrestres ou marines et l'évolution des dates d'activités agricoles saisonnières, montrent aussi la survenue d'un réchauffement climatique. Bien que difficiles à quantifier, ces éléments sont importants et ont des

conséquences dans de nombreux domaines d'activités professionnelles où ils sont largement pris en compte.

En résumé, depuis la seconde moitié du XIX^e siècle, plusieurs indicateurs indépendants montrent sans ambiguïté un réchauffement climatique, post-Petit âge glaciaire², modulé dans le temps, avec une augmentation de 1975 à 2003.

1-2. LES FACTEURS D'ÉVOLUTION DU CLIMAT

On observe l'évolution de certains des facteurs susceptibles d'avoir un effet plus ou moins important sur l'équilibre du climat.

1. **L'augmentation des concentrations atmosphériques des gaz à effet de serre**, autres que la vapeur d'eau qui se recycle rapidement et en permanence, est un élément très important, qui doit être observé avec précision sur plusieurs décennies pour donner lieu à une interprétation fiable.

Le dioxyde de carbone (CO₂) : sa concentration augmente continûment depuis le milieu du XIX^e siècle, en raison principalement des activités industrielles, passant de 280 ppm vers 1870 à 388 ppm en 2009. Le taux de croissance mesuré depuis 1970 est environ 500 fois plus élevé que celui observé en moyenne sur les 5 000 dernières années. Les études isotopiques montrent que l'origine de cette augmentation est due pour plus de la moitié à la combustion des combustibles fossiles, le reste aux déboisements massifs et pour une faible part à la production de ciment.

Le méthane (CH₄) : dû notamment aux fermentations diverses (zones humides, ruminants, déchets domestiques, biomasse, ...), aux fuites de gaz naturels et à la fonte du pergélisol, sa concentration s'est accrue de 140 % sur la même période. Elle semble cependant stabilisée depuis 2000.

Le protoxyde d'azote (N₂O) : dû en grande partie aux activités agricoles (dont la biodégradation des nitrates agricoles dans les milieux souterrains anoxiques), sa concentration a augmenté de 20 % sur la même période.

L'augmentation de l'effet de serre induit pour l'ensemble de ces trois composants est de 2,3 W/m².

2. **La radiation du Soleil** reçue par la Terre hors de l'atmosphère à une latitude donnée en été ou en hiver dépend de la luminosité du Soleil et de la distance de la Terre au Soleil, et de l'orientation de l'axe de rotation de la Terre. Ces derniers paramètres varient à l'échelle de dizaines de milliers d'années en raison de perturbations gravitationnelles exercées par la Lune et les autres planètes. Les périodes associées (20 000 ans, 40 000 ans,

² Petit âge glaciaire : période de refroidissement s'étendant entre 1300 et 1870.

100 000 ans) se retrouvent dans les cycles glaciaires-interglaciaires du Quaternaire et dans les données sédimentaires plus anciennes. Les variations de radiation saisonnières ou en latitude qu'elles induisent sont importantes, alors que les variations moyennes annuelles calculées sur la surface totale de la Terre sont faibles. L'énergie totale rayonnée par le Soleil est dominée par la partie visible du spectre et a très peu varié au XX^e siècle si on fait la moyenne sur les cycles d'activité de 11 ans. La variation relative de cette énergie durant ces cycles est de l'ordre du millième. Le forçage³ correspondant, de l'ordre de 0,2 W/m², est 10 fois plus faible que celui dû à l'augmentation de l'effet de serre lié aux activités humaines.

Les cycles d'activité du Soleil⁴ affectent principalement la partie ultraviolette du spectre solaire, mais aussi le vent solaire et les rayons cosmiques, qui subissent de fortes variations de leur amplitude pendant le cycle solaire ainsi que sur des périodes de plusieurs décennies. L'une de ces variations se manifeste par le « Minimum de Maunder » qui a vu, pendant plus de 50 ans, une très faible activité solaire révélée par l'absence quasi totale de taches solaires (*ca* 1645-1715). Cette observation coïncide approximativement avec les phases les plus marquées du Petit âge glaciaire. Il est intéressant de noter que le minimum solaire récent est le plus long depuis 40 ans. L'activité solaire sur cette période montre, pour plusieurs indicateurs, une diminution aussi bien des minimas que des maximas, le minimum actuel correspondant à une absence de taches solaires pendant 266 jours, situation inédite depuis plus de 40 ans. L'irradiance mesurée depuis l'espace a diminué de 0,02 % entre l'avant-dernier et le dernier cycle solaire, tandis que les indicateurs climatiques ont montré un réchauffement sur cette période de 40 ans.

L'activité du Soleil ne peut donc être le facteur dominant de ce réchauffement, même si des corrélations entre l'activité solaire et certaines variations à *court terme* de la température terrestre ont été mises en évidence, qui pourraient être le signe d'un couplage. Tous les mécanismes

³ Forçage : déséquilibre dans le bilan énergétique de la Terre, résultant, par exemple, de modifications de la quantité d'énergie reçue du Soleil, de changements dans la quantité ou dans la nature des gaz ou des particules à effet de serre, ou de changement dans la nature de la surface terrestre. Le forçage, exprimé en watts par mètre carré (W/m²), peut être d'origine naturelle ou anthropique. Le forçage radiatif varie au gré de la vie du couple Soleil-Terre de façon quasi périodique. Au contraire, le forçage anthropique a augmenté avec la population de la Terre.

⁴ On désigne par « activité du Soleil » les phénomènes associés au champ magnétique du Soleil et aux éjections de matière et de particules de haute énergie (taches solaires, éruptions et vent solaire par exemple). L'activité solaire varie périodiquement avec des cycles d'environ 11 ans et 23 ans. Certaines quantités liées au cycle d'activité (éruptions, particules de haute énergie) varient dans des proportions considérables (de quelques unités à plus de cent pour les taches solaires). L'amplitude de la variation au cours du cycle montre elle même une variabilité à long terme avec des minima spectaculaires. L'énergie totale rayonnée par le Soleil sous forme de rayonnement électromagnétique (lumière visible mais aussi infrarouge et ultraviolet) est appelée « irradiance ». Il y a une très faible variation de l'irradiance (de l'ordre de un millième) associée au cycle d'activité.

de transmission et d'amplification du forçage solaire, et en particulier de l'activité solaire, ne sont pas encore bien compris. Il faut noter que si le cycle de 11 ans de l'activité du Soleil tendait à diminuer d'intensité, comme cela a été le cas dans le passé, un ralentissement graduel du réchauffement global pourrait se produire.

1-3. L'ÉTUDE DES CLIMATS DU PASSÉ

Les climats du passé nous sont accessibles par un ensemble d'indicateurs, qui sont :

- les indicateurs géologiques (géochronologie, paléotempératures, sédiments, charbons, fossiles) ;
- l'observation directe des bulles d'air de l'atmosphère du passé piégées dans les carottes de glace extraites des calottes du Groenland et de l'Antarctique ainsi que leur analyse chimique très précise, indicateurs qui couvrent 800 000 ans en Antarctique et 123 000 ans au Groenland ;
- l'observation de traceurs isotopiques indicateurs de la température ;
- l'observation, l'analyse statistique, la géochimie isotopique sur les sédiments et sur les microfaunes marines.

C'est ainsi qu'on admet, par exemple, autour de 700 millions d'années, une Terre largement recouverte de glace, ou encore l'existence d'un refroidissement général mais non linéaire depuis 60 millions d'années, avec l'apparition de la calotte glaciaire antarctique il y a 35 millions d'années, et celles de l'hémisphère Nord, il y a environ 4 millions d'années. L'actuelle évolution climatique se place par rapport au réchauffement climatique naturel postérieur à la dernière glaciation.

Les observations dans les carottages de glaces donnent des indications précieuses sur la température et le contenu de l'atmosphère en CO₂ et autres gaz à effet de serre (CH₄) qu'on peut combiner avec des analyses géologiques de sédiments marins sur l'extension des calottes glaciaires au cours des cycles glaciations/déglaciations du Quaternaire. Ces observations peuvent aider à la modélisation des mécanismes du climat et à la définition de tests qui peuvent être utilisés pour la validation des modèles climatiques. Les changements associés aux déglaciations montrent des effets complexes : un réchauffement dans l'Antarctique précède de 800 ans une augmentation du CO₂ ; celle-ci est elle-même suivie, 4 000 ans plus tard, d'une réduction des calottes glaciaires dans l'hémisphère Nord, susceptible de réduire l'albédo⁵ et de provoquer ainsi une amplification du réchauffement. Ces transitions complexes constituent autant de situations observées permettant de tester les modèles. Les analyses de la glace des calottes polaires montrent que les concentrations

⁵ Albédo : fraction de l'énergie solaire réfléchi vers l'espace.

en CO₂, CH₄ et N₂O n'ont vraisemblablement jamais été aussi élevées depuis 800 000 ans⁶.

2- LES MÉCANISMES CLIMATIQUES

Le Soleil, par l'énergie que la Terre en reçoit, est le moteur principal de la machine climatique. L'énergie rayonnée par le Soleil fait l'objet d'observations dont la précision s'est accrue avec les données fournies par les satellites.

Une partie de l'énergie solaire (principalement contenue dans la partie visible du spectre électromagnétique) est directement renvoyée vers l'espace par les nuages et la surface terrestre (albédo) ; l'autre partie est absorbée par le sol et les océans. En situation d'équilibre, ces derniers rayonnent toute cette énergie dans l'infrarouge en direction de l'espace. Mais l'atmosphère⁷, à son tour, absorbe une partie de ce rayonnement terrestre et le réémet à la fois vers l'espace et vers le sol. La surface de la Terre est donc plus chaude qu'elle ne le serait sans atmosphère : c'est ce qui est connu sous le nom *d'effet de serre*.

Les molécules responsables de cet effet sont la vapeur d'eau, le gaz carbonique et d'autres gaz comme le méthane et le protoxyde d'azote.

Quand les conditions changent — que ce soit par l'énergie reçue du Soleil ou par le contenu en gaz à effet de serre — le système climatique évolue vers un nouvel état d'équilibre. C'est ce que les climatologues désignent sous le vocable de réponse à un *forçage*. Dans cette évolution, le changement d'un paramètre entraîne des modifications d'autres paramètres : par exemple, l'élévation de température augmente le contenu en vapeur d'eau et en gaz carbonique de l'atmosphère, modifie la couverture nuageuse, diminue le volume des glaces continentales, etc. L'augmentation de température de l'océan risque de diminuer l'efficacité de celui-ci pour absorber une partie du carbone anthropique. Ces rétroactions peuvent être positives, renforçant l'effet du forçage initial, ou négatives quand elles le réduisent. Selon les paramètres qui entrent en jeu, ces effets, qui peuvent être quantitativement importants, se manifestent sur des périodes courtes, de quelques jours pour l'évolution de l'atmosphère ou, au contraire, très longues pour l'océan.

Les effets potentiels de l'activité du cycle solaire sur le climat sont l'objet de controverses mais donnent lieu à des recherches actives. Certains mécanismes invoqués concernent l'effet du rayonnement cosmique galactique, fortement modulé par le vent solaire qui pourrait affecter la formation des nuages ; des couplages supplémentaires entre la stratosphère et la troposphère associés à des

⁶ Cependant, aux cours des temps géologiques, la concentration en CO₂ a pu être bien supérieure à la concentration actuelle ; par exemple, elle est estimée à environ 4 000 ppm au début de l'ère Tertiaire (- 60 à - 50 millions d'années).

⁷ L'atmosphère est composée de plusieurs couches superposées, dont les deux plus proches du sol interviennent dans le climat : la troposphère, qui s'étend de la surface de la Terre jusqu'à une altitude de 8 à 16 km et la stratosphère de 16 à 50 km.

courants électriques sont également évoqués. Ces effets, secondaires par rapport à l'effet des conditions atmosphériques telles que la teneur en vapeur d'eau, la stabilité et la circulation générale de l'atmosphère, etc., dépendent d'une physique sous-jacente qui fait actuellement l'objet d'études expérimentales au CERN. D'autres mécanismes, qui mettent en jeu l'évolution importante de la composante UV au cours du cycle et qui modifient la distribution d'ozone stratosphérique, sont actuellement à l'étude.

L'océan est un élément essentiel du système climatique, en raison de sa dynamique et de son inertie thermique qui lui confèrent une évolution beaucoup plus lente que celle de l'atmosphère. Il joue ainsi un rôle de régulateur à long terme du système, retardant de plusieurs siècles, voire millénaires, le retour à l'équilibre après des perturbations climatiques majeures. Des couplages de l'océan avec l'atmosphère, encore insuffisamment connus, naissent les grandes perturbations climatiques naturelles, comme El Niño ou l'Oscillation Nord-Atlantique, qui se manifestent sur des échelles de temps de quelques années à quelques décennies.

Les calottes glaciaires et les climats du Quaternaire sont connus à partir des analyses des carottages de glace. Ils ont montré, à la fois une oscillation entre périodes glaciaires et interglaciaires, et une stabilité globale pendant les derniers millénaires, indiquant l'existence d'au moins une rétroaction négative efficace, en premier lieu l'émission de rayonnement infrarouge terrestre. Les basculements entre périodes glaciaires et interglaciaires semblent, eux, affectés par des rétroactions positives fortes entre température, contenu en CO₂ et surfaces des calottes glaciaires de l'hémisphère Nord pour les variations les plus rapides.

Les gaz à effet de serre

L'effet direct d'un changement de concentration du CO₂ sur l'atmosphère est bien compris. Il se traduit par une augmentation du rayonnement infrarouge émis par le sol, évaluée à $3,7 \pm 0,1$ W/m² pour un doublement du CO₂ atmosphérique, correspondant à un réchauffement moyen en surface évalué à $1,1 \pm 0,2$ °C.

Environ la moitié du CO₂ produit par les activités humaines à un moment donné et rejeté dans l'atmosphère, y subsiste. L'autre moitié est actuellement absorbée par l'océan⁸ et la végétation continentale : il faut environ un siècle pour que la fraction transmise à l'atmosphère soit diminuée de moitié. La connaissance des mécanismes d'échanges océan-atmosphère et continent-atmosphère a fait de grands progrès mais reste encore incertaine pour des prédictions plus précises à l'échelle du siècle. Cette connaissance dépend de la description de la circulation océanique profonde et de la complexité de la photosynthèse.

⁸ Il est à noter que l'augmentation de la température de l'océan pourrait diminuer la capacité de celui-ci à absorber le CO₂. Par ailleurs, l'augmentation de la concentration du CO₂ dans l'océan entraîne son acidification, qui a des conséquences négatives importantes sur la faune et la flore océaniques.

Les incertitudes sur l'effet global indirect d'un changement de concentration du CO₂, avec toutes les rétroactions prises en compte, font l'objet de débats au sein de la communauté des climatologues. La complexité des rétroactions a conduit la majorité des scientifiques à conclure que les modèles sont indispensables pour évaluer correctement cet effet indirect.

3. LES MODÈLES CLIMATIQUES

Les modèles climatiques se sont perfectionnés depuis 30 ans, prenant en compte de nombreux mécanismes ignorés dans les premiers modèles. Cependant, l'évaluation des incertitudes est au centre des débats.

3-1. DEUX TYPES DE DESCRIPTIONS DES PROCESSUS

La modélisation des processus doit tenir compte de deux types de mécanismes : tout d'abord ceux pour lesquels les processus physicochimiques sont bien compris et peuvent être traduits en équations, et les autres, trop complexes, qui ne peuvent être actuellement décrits que par des relations phénoménologiques fondées sur des observations.

Dans le premier groupe figurent :

- la circulation tridimensionnelle de l'atmosphère et son évolution ;
- le forçage radiatif, qui fait l'objet d'une modélisation physique du transfert de rayonnement au travers de l'atmosphère gazeuse, prenant en compte sa composition chimique, la stratification de la température et la présence d'aérosols ;
- l'hydrodynamique des modèles de circulation océanique.

Pour ces mécanismes, les limitations des résolutions spatiale et temporelle des modélisations sont liées à la puissance des ordinateurs et aux performances des algorithmes utilisés.

Le second groupe de processus demande une part de modélisation empirique.

Les rétroactions à un forçage, qui émergent des modèles, dépendent de processus des deux types.

La rétroaction radiative de **la vapeur d'eau** à une élévation de température de $1,1 \pm 0,2$ °C produite par un doublement du CO₂, conduit, dans toutes les modélisations, à augmenter l'effet direct de 0,5 à 1 °C. Les recherches continuent sur d'éventuels effets complémentaires induits.

L'effet des nuages — gouttelettes d'eau liquide ou particules de glace — peut varier de manière importante selon les modélisations : la description de l'évolution de la nébulosité reste unanimement reconnue comme la partie la plus incertaine. Les nuages exercent deux effets antagonistes : un effet « parasol » renvoyant le flux solaire vers l'espace (rétroaction négative par les nuages bas) et un effet de serre (rétroaction positive par les nuages hauts). Les modèles les moins « sensibles » prédisent un effet global des nuages approximativement neutre, alors que les modèles plus « sensibles » conduisent à un réchauffement supplémentaire de l'ordre de 2 °C, pour un doublement de la concentration en CO₂.

Les modèles climatiques actuels ont une résolution spatiale de plusieurs dizaines, voire centaines de kilomètres, qui ne permet pas de décrire les nuages individuellement mais seulement statistiquement, au travers de modèles empiriques.

La distribution géographique du contenu en vapeur d'eau donnée par les modèles les plus récents est très semblable à celle qui est observée, ce qui conforte la modélisation.

Les variations multidécennales de l'océan (Oscillations Nord-Atlantique, El Niño, ...) sont encore difficiles à modéliser.

La fonte des glaces sous l'effet d'un réchauffement est un mécanisme agissant à long terme. Les effets de la dynamique des calottes polaires commencent à être pris en compte dans des modèles climatiques couplés.

Les effets de la végétation ou de la biologie marine, qui affectent directement l'albédo des surfaces continentales ou marines, ne peuvent être modélisés à partir de processus biologiques fondamentaux. L'albédo est décrit par des relations empiriques, déduites d'une combinaison d'observations satellitaires et au sol.

3-2. TESTS DE VALIDATION

La démarche actuelle de validation des modèles climatiques est de travailler avec une hiérarchie de tests. Le modèle est développé à partir d'études de processus, telles que les campagnes d'observation d'un type de nuage ou de végétation. Une fois sa formulation définie, on le fait fonctionner en « mode météo » (court terme) ou en simulation des instabilités naturelles pluriannuelles, ou encore par référence au cycle saisonnier ou aux climats anciens. Les comparaisons avec les données d'observation sont faites sur un grand nombre de paramètres. Elles constituent la seule façon de tester ces modélisations et de comparer à la réalité l'amplitude des rétroactions révélées par les modèles.

La capacité des modèles climatiques à reproduire les évolutions passées du climat à l'échelle pluridécennale est limitée par le fait que des données homogènes ne sont apparues que dans les années 1970.

Des résultats très significatifs ont été obtenus : réchauffement plus fort à la surface des continents qu'à la surface des océans, et plus fort encore dans les régions arctiques, diminution des extrêmes de froid, augmentation de la fréquence des événements extrêmes chauds, diminution globale de la cryosphère⁹, réchauffement de l'atmosphère tropicale plus fort en altitude qu'à la surface, variabilité naturelle à l'échelle décennale des tendances globales au réchauffement au cours du XX^e siècle, décroissance de la surface des glaces de mer arctiques à partir de 1975-80.

La validité des projections pour les décennies à venir et leurs incertitudes sont une question centrale. La comparaison des résultats de ces projections fournit une indication sur les incertitudes dues aux différences de modélisation de certains mécanismes. De plus, les mécanismes non encore identifiés ne sont naturellement pas inclus dans les modèles.

Les corrélations directes purement statistiques entre deux quantités sont utiles pour mettre en évidence des couplages non modélisés ou mal représentés, mais non pour tester précisément les mécanismes internes aux modèles et leur pertinence quant à la simulation des variations du climat. C'est une partie des débats actuels entre scientifiques.

Les éventuels comportements fortement instables ou chaotiques du système atmosphère-océan-cryosphère-surfaces continentales sont un autre facteur important d'incertitude.

La nature des comportements chaotiques ou de bifurcations entre états bien distincts du système climatique demeure ouverte et fait l'objet d'un intense effort de recherche au niveau international.

⁹ La cryosphère désigne l'ensemble des glaces de la Terre (grandes calottes glaciaires de l'Antarctique et du Groenland, glaciers de montagne, banquise).

CONCLUSIONS

- Plusieurs indicateurs indépendants montrent une augmentation du réchauffement climatique de 1975 à 2003.
- Cette augmentation est principalement due à l'augmentation de la concentration du CO₂ dans l'atmosphère.
- L'augmentation de CO₂ et, à un moindre degré, des autres gaz à effet de serre, est incontestablement due à l'activité humaine.
- Elle constitue une menace pour le climat et, de surcroît, pour les océans en raison du processus d'acidification qu'elle provoque.
- Cette augmentation entraîne des rétroactions du système climatique global, dont la complexité implique le recours aux modèles et aux tests permettant de les valider.
- Les mécanismes pouvant jouer un rôle dans la transmission et l'amplification du forçage solaire et, en particulier, de l'activité solaire ne sont pas encore bien compris. L'activité solaire, qui a légèrement décru en moyenne depuis 1975, ne peut être dominante dans le réchauffement observé sur cette période.
- Des incertitudes importantes demeurent sur la modélisation des nuages, l'évolution des glaces marines et des calottes polaires, le couplage océan-atmosphère, l'évolution de la biosphère et la dynamique du cycle du carbone.
- Les projections de l'évolution climatique sur 30 à 50 ans sont peu affectées par les incertitudes sur la modélisation des processus à évolution lente. Ces projections sont particulièrement utiles pour répondre aux préoccupations sociétales actuelles, aggravées par l'accroissement prévisible des populations.
- L'évolution du climat ne peut être analysée que par de longues séries de données, à grande échelle, homogènes et continues. Les grands programmes d'observations internationaux, terrestres et spatiaux, doivent être maintenus et développés, et leurs résultats mis à la libre disposition de la communauté scientifique internationale.
- Le caractère interdisciplinaire des problèmes rencontrés impose d'impliquer davantage encore les diverses communautés scientifiques pour poursuivre les avancées déjà réalisées dans le domaine de la climatologie et pour ouvrir de nouvelles pistes aux recherches futures.

ANNEXES

1. Lettre de mission de la Ministre de l'Enseignement supérieur et de la Recherche
2. Académie des sciences – Travaux antérieurs sur les questions climatiques



MINISTÈRE
DE L'ENSEIGNEMENT SUPÉRIEUR
ET DE LA RECHERCHE

La Ministre

OP/DBX

Paris, le - 1 AVR. 2010

Cher Monsieur le Président,

Des voix s'élèvent aujourd'hui pour remettre en cause l'existence d'un large consensus parmi les chercheurs sur les causes et les conséquences du changement climatique.

Pour ma part, je constate que les travaux, les conclusions et les méthodes des climatologues français font depuis des années l'objet d'une indiscutable reconnaissance dans la communauté scientifique nationale et internationale. Cette reconnaissance unanime fonde la confiance que le Gouvernement leur porte.

L'engagement personnel du Président de la République dans les négociations internationales sur le changement climatique, tout comme le Grenelle de l'environnement ou la place qu'a tenue la question du climat dans l'élaboration de notre stratégie nationale de recherche et d'innovation sont là pour en témoigner.

C'est en effet en s'appuyant sur les travaux scientifiques qui portent sur les évolutions actuelles du climat que le Gouvernement a fait une priorité absolue de la lutte contre le changement climatique.

Il ne revient bien évidemment pas aux responsables politiques, mais à la communauté scientifique de trancher des différends portant sur des travaux de recherche. C'est pourquoi je souhaiterais que l'Académie des sciences organise, dans les meilleurs délais, un débat scientifique approfondi pour permettre la confrontation sereine des points de vue et des méthodes et établir l'état actuel des connaissances scientifiques sur le changement climatique.

.../...

Monsieur Jean SALENÇON
Président
Académie des sciences
23, Quai Conti
75006 PARIS

Ce débat se déroulera en parallèle du processus lancé par le Secrétaire général de l'Organisation des Nations Unies, qui a saisi l'*InterAcademy Council* afin que celui-ci procède à une analyse scientifique approfondie et indépendante des méthodes et conclusions du Groupe intergouvernemental d'experts sur l'évolution du climat.

L'Académie des Sciences étant membre de l'*InterAcademy Council*, je souhaite que ces deux débats n'interfèrent pas l'un avec l'autre.

Je vous prie d'agréer, Monsieur le Président, l'expression de ma meilleure considération.

Précisément,



Valérie PECRESSE



Travaux antérieurs sur les questions climatiques

Rapports

Démographie, climat et alimentation mondiale. Léridon H. et de Marsily G. coord. À paraître (EDP Sciences)

Événements climatiques extrêmes – réduire la vulnérabilité des systèmes écologiques et sociaux. Décamps H. coord. (EDP Sciences 2010)
http://www.academie-sciences.fr/publications/rapports/rapports_html/RST29.htm

Cycles biogéochimiques et écosystèmes continentaux. Pédro G. coord. (EDP Sciences 2007)
http://www.academie-sciences.fr/publications/rapports/rapports_html/RST27.htm

Énergie 2007-2050 - Les choix et les pièges. Tissot B. coord. (auto-édition 2007)
http://www.academie-sciences.fr/publications/rapports/pdf/rapport_energie_07_07.pdf

Les eaux continentales. de Marsily G. coord. (EDP Sciences 2006)
http://www.academie-sciences.fr/publications/rapports/rapports_html/RST25.htm

Perspectives énergétiques. Tissot B. coord. (auto-édition 2005)
http://www.academie-sciences.fr/actualites/textes/energie_01_03_05.pdf

L'énergie nucléaire civile dans le cadre temporel des changements climatiques. Dautray R. (Tec & Doc 2001)
http://www.academie-sciences.fr/publications/rapports/rapports_html/rapport_Dautray.htm

De la préservation du cadre de vie à la transition vers le développement durable, Brézin E. coord. In : *Accès de tous à la connaissance, préservation du cadre de vie, amélioration de la santé, trois enjeux – Rapport à Monsieur le Président de la République* (Tec & Doc 2000)

Conséquences scientifiques, juridiques et économiques du Protocole de Kyoto. Kovalevsky J. coord. (Tec & Doc 2000)
http://www.academie-sciences.fr/publications/rapports/rapports_html/rapport45_AsAsmp.htm

L'ozone stratosphérique. Mégie G. (Tec & Doc 1998)
http://www.academie-sciences.fr/publications/rapports/rapports_html/rapport41_As.htm

Impact de la flotte aérienne sur l'environnement atmosphérique et le climat. Chanin M-L. coord. (Tec & Doc 1997)

http://www.academie-sciences.fr/publications/rapports/rapports_html/rapport40_As_fr.htm

L'effet de serre et ses conséquences climatiques. Dautray R. coord. (Tec & Doc 1994)

Ozone et propriétés oxydantes de la troposphère. Mégie G. coord. (Tec & Doc 1993)

La Lettre de l'Académie des sciences

N° 27 2009 et 2010 : *Poursuite de l'âge d'or de l'astronomie* (2010)

http://www.academie-sciences.fr/publications/lettre/pdf/lettre_27.pdf

N° 21 *Évolution des climats* (2007)

http://www.academie-sciences.fr/publications/lettre/pdf/lettre_21.pdf

Comptes Rendus de l'Académie des sciences (numéros thématiques)

Atmosphère vue de l'espace (CR Geoscience, Vol 342, n° 4-5, 2010)

<http://www.em-consulte.com/revue/cras2a/342/4-5>

Histoire climatique des déserts d'Afrique et d'Arabie (CR Geoscience, Vol. 341, n° 8-9, 2009)

<http://www.em-consulte.com/revue/cras2a/341/8-9>

Écosystèmes et événements climatiques extrêmes (CR Geoscience, Vol. 340, n° 9-10, 2007)

<http://www.em-consulte.com/revue/cras2a/340/9-10>

Climats, cultures et sociétés aux temps préhistoriques. De l'apparition des Hominidés jusqu'au Néolithique (CR Palevol, Vol. 5, n°1-2, 2006)

<http://www.em-consulte.com/revue/palevo/5/1-2>

Effets de serre, impacts et solutions : quelle crédibilité (CR Geoscience, Vol 335, n° 6-7, 2003)

http://www.academie-sciences.fr/publications/comptes_rendus/pdf/CRGeoscience_thema1.pdf

<http://www.em-consulte.com/revue/cras2a/335/6-7>

Avis du G8

Déclaration commune des Académies des sciences : *Sur le changement climatique et les transformations des technologies de l'énergie pour un avenir à bas carbone* (2009)

http://www.academie-sciences.fr/actualites/communiqués/communiqués_html/G8_2009.htm

Déclaration commune des Académies des sciences : *Adaptation au changement climatique et transition vers une société à bas carbone* (2008)

http://www.academie-sciences.fr/actualites/communiqués/communiqués_html/G8_2008.htm

Déclaration commune des Académies des sciences : *Croissance et responsabilité : pérennité et efficacité de l'énergie, et protection du climat* (2007)

http://www.academie-sciences.fr/actualites/communiqués/communiqués_html/G8_2007.htm

Déclaration commune des Académies des sciences : *Pérennité et sécurité de l'énergie* (2006)

http://www.academie-sciences.fr/actualites/communiqués/communiqués_html/G8_2006.htm

Déclaration commune des Académies des sciences : *Sur la réponse globale au changement climatique* (2005)

http://www.academie-sciences.fr/actualites/communiqués/communiqués_html/G8.htm

Publications exclusivement en ligne

Libres points de vue d'académiciens sur l'environnement et le développement durable (2009)

http://www.academie-sciences.fr/actualites/textes/points_vue_25_11_09.pdf

Le livret de l'environnement (2008)

http://www.academie-sciences.fr/publications/rapports/pdf/livret_environnement_04_08.pdf

Colloques et séances publiques

Les populations et leurs consommations d'énergie en 2200 : quelles perspectives ?
Quels environnements ? Quelles actions à moyen et long termes (2009)

http://www.academie-sciences.fr/conferences/seances_publices/pdf/defis21_06_10_09.pdf

La séquestration du CO₂ (2009)

http://www.academie-sciences.fr/conferences/seances_publices/pdf/debat_19_05_09_programme.pdf

La combustion face aux défis de l'énergie et de l'environnement : des questions brûlantes (2008)

http://www.academie-sciences.fr/conferences/seances_publices/html/defis21_11_03_08.htm

Comprendre les effets du changement climatique sur les êtres vivants : la question des mécanismes en jeu (2008)

http://www.academie-sciences.fr/conferences/seances_publices/html/defis21_15_01_08.htm

Écosystèmes et événements climatiques extrêmes (2007)

http://www.academie-sciences.fr/conferences/colloques/colloque_html/colloque_04_07_07.htm

Climat (2007)

http://www.academie-sciences.fr/conferences/seances_publices/html/debat_13_03_07.htm

GIEC – Le groupe intergouvernemental d'experts sur l'évolution du climat (2007)

http://www.academie-sciences.fr/conferences/seances_publices/pdf/Giec_06_02_07.pdf

Quelques-uns des problèmes de l'eau : adéquation besoins-ressources à l'heure des changements climatiques (2007)

http://www.academie-sciences.fr/conferences/seances_publicques/pdf/defis21_30_01_07.pdf

Activité cyclonique et changement climatique (2006)

http://www.academie-sciences.fr/conferences/seances_publicques/pdf/IC_Andre_07_03_06.pdf

Éruptions volcaniques, changement climatique global et évolution des espèces : des dinosaures, de leur disparition et de notre avenir sur cette planète (2006)

http://www.academie-sciences.fr/conferences/seances_publicques/html/defis21_17_01_06.htm

Changement climatique - Surprises éventuelles et solutions possibles ? (2005)

http://www.academie-sciences.fr/conferences/seances_publicques/pdf/John_Shepherd_13_12_05.pdf

Étude des eaux continentales depuis l'espace (2005)

http://www.academie-sciences.fr/conferences/seances_publicques/pdf/Anny_Cazenave_08_02_05.pdf

Climats, cultures et sociétés aux temps préhistoriques. De l'apparition des Hominidés jusqu'au Néolithique (2004)

http://www.academie-sciences.fr/conferences/colloques/pdf/colloque_13_09_04_programme.pdf

Faire de la minéralogie pour l'environnement une science renouvelée pour faire face à la question du développement durable (2003)

http://www.academie-sciences.fr/conferences/seances_publicques/pdf/Annibale_Mottana_09_12_03.pdf

Dôme C Antarctique : vers des enregistrements glaciaires vieux de 800 000 ans ? (2003)

http://www.academie-sciences.fr/conferences/seances_publicques/pdf/Iouzel_Raynaud_25_02_03.pdf

Effets de serre, impacts et solutions. Quelle crédibilité ? (2002)

http://www.academie-sciences.fr/actualites/communiqués/communiqués_html/dossier_colloque_16_09_02.htm