



Photo de la Documentaire Channel / Roussette

# Les limites des prévisions climatiq

Les incertitudes liées aux modèles de prévision climatique sont principalement dues à la modélisation imparfaite des nuages, auxquelles s'ajoutent les incertitudes sur nos futurs modes de vie. Selon la climatologue Sylvie Joussaume, si nous attendons d'avoir validé nos modèles, nous serons satisfaits de constater que nous avons raison, mais il sera trop tard pour agir.

**Pour la Science : Ne vous semble-t-il pas qu'aujourd'hui toutes les colères de la Terre sont mises sur le compte du réchauffement climatique, que ce soit la tempête du 26 décembre 1999, la canicule de 2003 ou la tornade qui a balayé la Nouvelle-Orléans à la fin de l'été 2005 ?**

**Sylvie Joussaume** : Il est impossible de se prononcer sur un événement exceptionnel et il ne faut pas céder à cette attitude réductrice. Néanmoins, nous allons voir qu'une modification du climat est réellement amorcée et que nous pouvons faire des prévisions dont nous analyserons la fiabilité. De plus, ces événements, qui vont plutôt dans le sens des prévisions, nous rappellent à quel point nous sommes dépendants des conditions météorologiques. Rappelons d'abord quelle est la différence entre prévision météorologique et prévision climatique. La prévision météorologique c'est prévoir le temps qu'il va faire, tel jour à tel endroit, c'est-à-dire prévoir quel sera l'état de l'atmosphère, sa pression, sa température, les précipitations, l'état des vents en un lieu et à un moment donné. Quand on fait des prévisions climatiques, on s'intéresse à des moyennes et aux écarts par rapport à ces moyennes. Quiconque fait des prévisions climatiques parle en termes statistiques.

**Pour la Science : Quels sont les différents paramètres qui déterminent le climat ?**

**Sylvie Joussaume** : Le premier élément, c'est d'abord l'énergie que la Terre reçoit du Soleil, avec un excédent dans les régions tropicales et un déficit vers les hautes latitudes. L'atmosphère – avec les vents – et les océans – avec les courants – transportent cette énergie, modulant les écarts de température qui, sinon, seraient plus importants. Le système, constitué des continents, des océans et de l'atmosphère, est chauffé par le rayonnement solaire,

mais émet lui-même un rayonnement infrarouge. En fait, le rayonnement reçu et le rayonnement émis s'équilibrent sur toute la planète. En pratique, sous les tropiques, le système reçoit plus de rayonnement qu'il n'en émet, ce qui est l'inverse aux latitudes élevées. Un autre élément est essentiel : il s'agit des gaz à effet de serre. C'est l'équilibre entre le rayonnement solaire qui arrive et le rayonnement infrarouge réémis aboutirait à une température de quelque  $-18^{\circ}\text{C}$  à la surface de la planète. En fait, le rayonnement infrarouge renvoyé par la surface est en partie capté par les gaz à effet de serre, qui eux-mêmes en renvoient vers la surface de la Terre et vers l'espace. Ce qui fait que les gaz à effet de serre réchauffent la surface. C'est pourquoi la température d'être égale à  $-18^{\circ}\text{C}$  à la surface de la Terre est en fait de  $15^{\circ}\text{C}$  (et qu'elle est de  $-18^{\circ}\text{C}$  en altitude, vers les hautes montagnes). Ainsi, l'effet de serre est positif : c'est lui qui a permis à la vie de se développer sur Terre. Aujourd'hui, ce qui préoccupe les climatologues ce n'est pas l'effet de serre lui-même, mais son renforcement, c'est-à-dire l'augmentation des émissions de dioxyde de carbone ou de méthane liées à l'utilisation de l'énergie fossile. Rappelons que l'atmosphère est constituée d'oxygène et d'azote, qui ne captent pas le rayonnement infrarouge, que le premier gaz à effet de serre, c'est la vapeur d'eau, et qu'ensuite viennent le dioxyde de carbone et le méthane.

**Pour la Science : Comment passe-t-on de ce bilan radiatif à l'étude de l'évolution du climat ?**

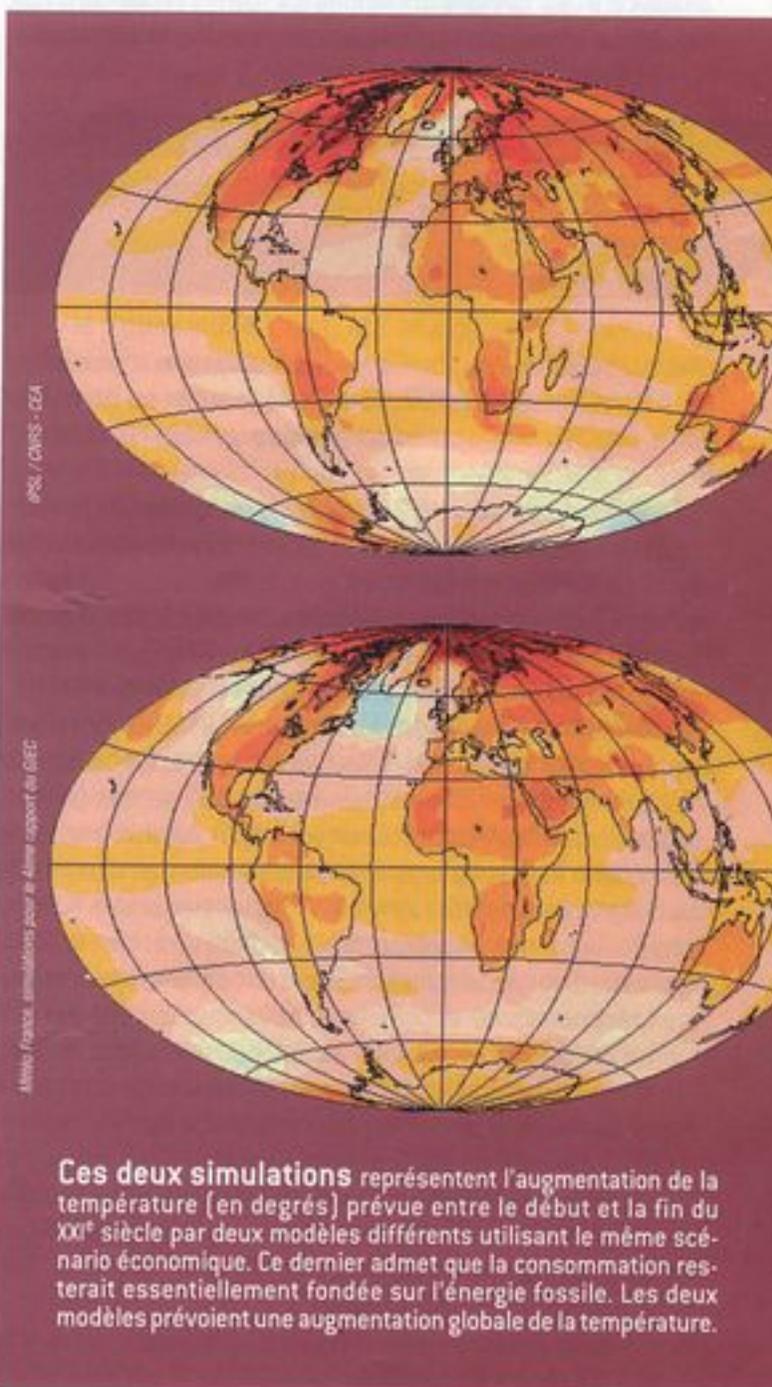
**Sylvie Joussaume** : On commence par des mesures de la température, de la pluviométrie et d'autres paramètres météorologiques. On a longtemps eu des difficultés à couvrir les océans, mais depuis une vingtaine d'années, les satellites permettent d'avoir une couverture globale. Au sol, des réseaux de mesures sont fonctionnel

1860, et l'on sait évaluer la température moyenne de la planète depuis cette date. Les climatologues ont choisi une période de référence (entre 1961 et 1990) et une température de référence, la moyenne des températures sur cette période ; ils déterminent les écarts annuels par rapport à cette température « normale ». Ainsi, à la fin du XIX<sup>e</sup> siècle et au début du XX<sup>e</sup>, la température était en général inférieure à celle de 1961-1990 et en un siècle on a connu deux phases de réchauffement. Une première entre 1910 et 1940 et une deuxième depuis les années 1975. Pour étudier le climat plus ancien, on fait de la paléoclimatologie, c'est-à-dire que l'on utilise des indicateurs indirects du climat passé : on étudie la nature des sédiments du fond des océans (les espèces piégées dans les sédiments reflètent la température des couches superficielles de l'eau) ou la composition des glaces de l'Antarctique. Cette composition donne la quantité d'oxygène 18, laquelle dépend de la température. De cette façon, on a reconstitué le climat sur 400 000 ans, d'après des enregistrements obtenus à Vostok au cœur de l'Antarctique.

Cet enregistrement est la pierre de Rosette de la climatologie. Il montre les grands cycles de 100 000, 40 000 et 20 000 ans commandés par le mouvement de la Terre autour du Soleil. Il y a 20 000 ans, c'était la dernière grande glaciation et on en retrouve des traces au fond des océans et dans les carottes de glace. Mais il a surtout permis de reconstituer l'histoire passée de la composition atmosphérique. À mesure que la neige se dépose, elle se tasse, piégeant de l'air. On a ainsi de l'air de 400 000 ans, voire de 650 000 ans « en conserve » en plein cœur de l'Antarctique, et il nous permet de remonter à la composition de l'atmosphère à cette époque. On constate que, par le passé, il y a eu des variations du dioxyde de carbone et du méthane. Ces variations sont naturelles, et l'homme n'y est pour rien. On constate qu'à chaque fois que le climat a été plus chaud, il y avait davantage de dioxyde de carbone et de méthane. Ces variations des gaz à effet de serre amplifient le changement déclenché par le mouvement de la Terre autour du Soleil. En revanche, ces mesures ont révélé que la concentration en dioxyde de carbone atteinte aujourd'hui (370 parties par million, soit 370 centimètres cubes de dioxyde de carbone par mètre cube d'air) dépasse les valeurs passées (la moyenne « naturelle » est comprise entre 200 et 280 parties par million). Qui plus est, cette augmentation s'est produite en 200 ans, beaucoup plus rapidement que les variations naturelles qui ont pris plusieurs milliers d'années.

**Pour la Science :** Comment les climatologues passent-ils de ces données anciennes aux prévisions concernant le climat du futur, où interviennent l'ensoleillement, l'atmosphère, les océans et les interactions de ces différents moteurs qui commandent le climat ?

**Sylvie Joussaume :** Dès que l'on cherche à savoir quel sera le climat de demain, on fait appel à la modélisation. On représente un système constitué de l'atmosphère, de l'océan, mais on prend aussi en compte la biosphère (le monde du vivant), les glaciers, la neige, des calottes polaires, la forme des océans ou encore celle des continents. Tous les constituants de ce système, nourris par l'énergie solaire, échangent de l'énergie, de l'eau, du carbone. Les constantes de réaction de ces constituants diffèrent. L'atmosphère réagit assez vite (entre quelques jours et quelques années), tandis que l'océan réagit beaucoup plus lentement (jusqu'à un millier d'années). La végétation met quelques dizaines,



voire une centaine, d'années à réagir. Pour représenter ce système, on découpe l'atmosphère et les océans (assimilés à des sphères) en un certain nombre de volumes élémentaires. Dans chacun de ces petits volumes (environ 300 kilomètres sur 300), on applique les lois physiques qui commandent les échanges d'énergie, les échanges d'eau, la conservation de la masse, etc. On obtient une valeur de la température et des vents dans chaque volume du maillage et l'on calcule comment cette température évolue en fonction des échanges avec les mailles voisines. Ces modèles exigent d'énormes capacités de calcul.

#### **Pour la Science : Comment ces modèles sont-ils validés ?**

**Sylvie Joussaume :** On les soumet à un grand nombre de cas-tests. Tout d'abord sur des cas simulant le climat actuel où l'on peut comparer les résultats du modèle aux observations disponibles. La modélisation des nuages est l'un des principaux enjeux, car la physique qui commande leur production est particulièrement complexe. Les modèles sont également validés sur les données anciennes afin de les tester dans des conditions climatiques différentes des conditions actuelles.

### **Les nuages sont l'une des principales causes de l'incertitude qui entache les modèles climatiques.**

#### **Pour la Science : Imaginons que vous disposiez d'un modèle performant, quel enseignement en tirez-vous en termes de prévision climatique ?**

**Sylvie Joussaume :** Nous disposons de tels modèles avec lesquels nous pouvons étudier l'impact sur le climat des variations de la concentration en gaz à effet de serre telles qu'elles sont prévues par les économistes en fonction de différents scénarios d'émission de ces gaz. Si aucune mesure n'est prise, les économistes prévoient que l'on atteindra 900 parties par million de dioxyde de carbone en 2100. Si l'on développe d'autres formes d'énergie, qui n'émettent pas de dioxyde de carbone, on pourrait n'atteindre que 500 parties par million (rappelons qu'aujourd'hui on est à 370). Ainsi, même dans le scénario le plus optimiste, la concentration en dioxyde de carbone va continuer à augmenter. Tous les cinq ans, le Groupe intergouvernemental d'experts sur l'évolution du climat, GIEC, fait le point sur cette question. Étant donné les enjeux sociaux, économiques et politiques, les climatologues doivent fournir les prévisions les plus fiables possibles pour que les décideurs prennent en toute connaissance de cause les mesures visant à limiter le phénomène. Le dernier rapport du GIEC qui date de 2001 a estimé qu'en 2100 l'augmentation de température atteindrait entre 1,4 et 5,8 degrés à l'échelle de la planète. Par comparaison, l'augmentation globale depuis 100 ans est estimée à quelque 0,6 degré et lors de la dernière glaciation, qui a eu lieu il y a 20 000 ans, la température globale moyenne était inférieure d'environ cinq degrés à celle qui règne aujourd'hui.

#### **Pour la Science : Pourquoi une telle fourchette ?**

**Sylvie Joussaume :** Une telle incertitude tient au fait que nous ignorons comment vont évoluer les émissions de dioxyde de carbone. Si l'on opte pour le scénario le plus « écologique » possible, le réchauffement ne devrait pas dépasser deux degrés. Au contraire, si l'on ne fait rien, il atteindra plutôt quatre à cinq degrés. C'est la société qui doit décider : ou bien réduire ses émissions, ou bien subir les conséquences de sa décision de ne rien décider. Une première incertitude tient à nos décisions et représente la marge de manœuvre dont nous disposons. Il existe une deuxième incertitude inhérente à nos modèles. Que l'on considère l'hypothèse haute ou basse, l'incertitude peut atteindre deux à trois degrés. Et les climatologues tentent de la réduire au maximum.

#### **Pour la Science : D'où vient cette incertitude ?**

**Sylvie Joussaume :** Dès le début des années 1990, on s'est rendu compte que la principale source d'incertitude dans ces modèles vient de la représentation des nuages. Pour qu'un nuage apparaisse, il faut qu'il y ait un noyau de condensation, puis qu'une petite gouttelette se forme autour de ce germe et grossisse par accumulation de molécules d'eau. Les gouttelettes finissent par coalescer, et quand elles sont assez grosses, elles tombent. On sait représenter les nuages, mais seulement de façon schématique. Or les nuages jouent un rôle important sur le bilan radiatif de la Terre : de façon schématique, les gros cumulus réfléchissent le rayonnement solaire (ce que l'on vérifie aisément les jours de mauvais temps) contribuant à refroidir le climat. Au contraire, les cirrus, ces nuages filamenteux très fins, en altitude, participent à l'effet de serre, et font plutôt augmenter la température. L'amplitude de l'élévation de la température varie selon la densité, la taille et l'altitude des nuages.

#### **Pour la Science : Une connaissance insuffisante des nuages explique en partie les incertitudes sur les modèles climatiques. Quel est le rôle des océans ?**

**Sylvie Joussaume :** Les océans jouent plusieurs rôles. Comme l'atmosphère, ils transportent de l'énergie et représentent donc une composante aussi importante que l'atmosphère pour calculer les prévisions climatiques. Contrairement à l'atmosphère, les océans ont une formidable inertie thermique, c'est-à-dire qu'il faut beaucoup de temps et d'énergie pour les réchauffer, de sorte qu'ils ralentissent le phénomène de réchauffement climatique. Sans océans, le réchauffement serait déjà plus marqué que ce que l'on observe. De surcroît, les océans absorbent une partie du carbone que l'on injecte dans l'atmosphère : la moitié du dioxyde de carbone atmosphérique est nettoyée par les océans et par la végétation et les sols. En revanche, on ignore si cette capacité d'absorption se maintiendra à long terme. En effet, on sait que les zones froides de l'océan absorbent le dioxyde de carbone et que les zones chaudes en relâchent, et les modifications de la circulation océanique les perturberont. De surcroît, l'absorption du dioxyde de carbone

acidifie les océans, ce qui modifie la formation du squelette de divers organismes marins, et une telle acidification pourrait avoir un impact à long terme sur la biologie marine.

**Pour la Science :** Vous avez évoqué les incertitudes liées à l'atmosphère, notamment aux nuages, celles liées aux océans, mais les glaciers ne jouent-ils pas aussi un rôle par leur pouvoir réfléchissant ?

**Sylvie Joussaume :** Effectivement, on estime que les glaciers régressent dans la zone tropicale et les moyennes latitudes : si nos prévisions sont correctes, d'ici 100 à 200 ans, il n'y aura plus beaucoup de glaciers dans les Alpes. En revanche, les températures dans l'Antarctique étant nettement plus froides, le volume des glaciers pourrait augmenter en raison de précipitations de neige plus abondantes. Mais dans l'ensemble la fonte des glaciers semble l'emporter.

**Pour la Science :** Les différents modèles climatiques disponibles indiquent une augmentation de la température. Malgré les incertitudes, il semble qu'une réduction même drastique de l'émission de gaz à effet de serre n'inverserait pas la tendance. Est-on dans une impasse ?

**Sylvie Joussaume :** Tous les indicateurs dont nous disposons nous font penser qu'un changement s'est amorcé et que, même s'il est resté relativement limité pour le moment, il va s'amplifier au XXI<sup>e</sup> siècle. Même si l'on parvient à réduire nos émissions, l'effet amorcé se poursuivra puisque le système présente une forte inertie. Le réchauffement continuera plus doucement, mais il continuera. Aujourd'hui si l'on voulait seulement stabiliser le niveau de dioxyde de carbone, il faudrait réduire d'un facteur trois les émissions au plan mondial. Le protocole de Kyoto, qui n'a pas été ratifié par les États-Unis, s'est fixé comme objectif de réduire de cinq pour cent les émissions par rapport au niveau d'émission de 1990. Bien sûr, le protocole de Kyoto est insuffisant, ce n'est qu'une prise de conscience, une amorce, mais elle était indispensable. On commence à envisager l'après Kyoto pour aller plus loin. En France, on parle du plan climat, et l'objectif annoncé est de diviser par quatre les émissions d'ici 2050. Plusieurs pays ont aujourd'hui pris conscience de la nécessité de réduire ces émissions. Concrètement, cela veut dire qu'il faut modifier notre mode de consommation d'énergie, développer l'utilisation d'énergies renouvelables, trouver de nouvelles technologies qui nous permettront de produire de l'énergie sans utiliser le charbon, le pétrole ou le gaz naturel. Qui plus est, nous avons une responsabilité vis-à-vis des pays comme la Chine et l'Inde qui vont consommer davantage d'énergie que par le passé et à qui nous devons apporter des technologies moins polluantes en termes d'effet de serre. On ne peut plus consommer à l'infini comme on le faisait, car une consommation sans bornes a des effets sur notre climat. Les chercheurs ont un défi : trouver de nouvelles technologies qui permettront de ne plus utiliser les énergies fossiles.

**Pour la Science :** Aujourd'hui, on entend quelques voix dissidentes assurant que les modèles sont si peu fiables

que les risques ne sont pas avérés. Est-ce pour éviter d'avoir à prendre des mesures impopulaires ?

**Sylvie Joussaume :** Il y a toujours différents courants de pensée. Le Groupe intergouvernemental d'experts sur l'évolution du climat dresse régulièrement un état aussi honnête et exhaustif que possible de nos connaissances sur la

**Si nous attendons de disposer de modèles plus fiables pour prendre des décisions, il sera trop tard, étant donné la forte inertie de la Terre.**

question du changement climatique. Quelque 200 scientifiques participent à la rédaction de ces rapports, lesquels sont envoyés dans plusieurs pays pour expertise contradictoire, c'est-à-dire pour que chacun puisse lire ce rapport, poser des questions, ouvrir un débat s'il le souhaite. Le compte rendu final représente un consensus. Les « dissidents » plaisent à ceux qui aiment la controverse.

**Pour la Science :** Des modèles plus fiables éviteront les incertitudes qui font le lit de la controverse. Ne peut-on pas attendre un peu que ces modèles aient été perfectionnés ? Y a-t-il réellement péril en la demeure ?

**Sylvie Joussaume :** Oui, et l'on doit agir avant que les modèles ne soient plus précis. Chaque jour ils sont améliorés, mais les rapports du Groupe intergouvernemental d'experts sur l'évolution du climat indiquent que les modifications sont déjà là. Le GIEC a publié un rapport en 1990, en 1995 et en 2001 (disponibles sur le site <http://www.ipcc.ch>). Aujourd'hui, le quatrième rapport est en cours d'élaboration et ses conclusions doivent arriver début janvier 2007. À la question « Est-ce qu'on détecte déjà un réchauffement ? » on était incapable de répondre en 1990 ; en 1995, un faisceau d'éléments suggérait une action de l'homme. Le rapport de 2001 indiquait que la majeure partie du réchauffement des 50 dernières années était due à l'augmentation des gaz à effet de serre. J'ignore quelles seront les conclusions du prochain rapport, mais à mesure que nos connaissances progressent, le réchauffement avance lui aussi. Si nous attendons d'être sûrs que nos modèles sont fiables pour agir, nous saurons que nous avons raison... mais il sera trop tard pour réagir. Nous devons commencer à prendre des mesures avant d'avoir la preuve... que les activités anthropiques réchauffent le climat de la Terre davantage et plus vite que toute autre variation climatique naturelle passée.

Sylvie JOUSSAUME est directrice de l'Institut national des sciences de l'Univers (INSU-CNRS).

Ce texte est un résumé d'une conférence que Sylvie Joussaume a donnée au Palais de la Découverte. Le texte intégral de la conférence sera en ligne sur le site de France Culture (<http://www.radiofrance.fr/chaines/france-culture/sommaire/>) durant le mois de juin 2006.