

Texte de la 205^e conférence de l'Université de tous les savoirs donnée le 23 juillet 2000.

**L'action de l'Homme sur le climat
par Hervé Le Treut**

Les risques de modifications du climat de la planète par l'émission de gaz à effet de serre sont désormais bien connus. Les mesures qui sont nécessaires pour faire face à ce problème sont d'une ampleur considérable, et impliquent des choix importants, dans le domaine énergétique ou le système de transport par exemple. La science seule ne peut servir d'arbitre entre ces différentes options : c'est au niveau politique ou citoyen qu'elles doivent être décidées. Il est donc très important qu'un public large puisse percevoir non seulement la réalité du risque de changement climatique, mais aussi, et peut-être surtout, puisse se faire une idée aussi juste que possible des certitudes ou incertitudes qui entourent ce problème.

Les modifications de la composition chimique de l'atmosphère

Tout commence par une constatation qui ne souffre aucune ambiguïté : depuis le début de l'ère industrielle la composition chimique de la planète a subi une évolution brutale, sans précédent au cours des derniers milliers d'années. Cette constatation résulte de mesures qui ont été faites soit dans les bulles d'air emprisonnées par les glaciers, pour les climats anciens, soit plus directement à partir d'un réseau planétaire qui est allé en s'étoffant au cours des dernières décennies. La teneur en dioxyde de carbone dont la valeur au cours des 400 000 dernières années avait oscillé entre 180 et 280 ppm (parties par millions) a brusquement dépassé 360 ppm. La concentration en méthane a presque triplé. Des composés largement nouveaux ont fait leur apparition, tels les CFCs, ou le protoxyde d'azote. Tous ces gaz ont un temps de recyclage relativement long (de la décennie pour le méthane, au siècle pour le dioxyde de carbone, ou à quelques siècles pour les CFCs) et donc tendent à s'accumuler dans l'atmosphère. De fait, au delà de l'évolution déjà constatée de la composition chimique de l'atmosphère, c'est sa poursuite inéluctable qui pose problème. Le siècle prochain devrait voir l'équivalent d'un doublement de la teneur atmosphérique en CO₂ (cet équivalent étant obtenu en cumulant l'effet de tous les gaz à effet de serre) pour tous les scénarios actuellement envisageables.

Bien sûr, de nombreux paramètres peuvent moduler cette évolution, et rapprocher ou éloigner cette échéance. D'abord, bien sûr, les caractéristiques du développement économique et démographique de la planète, et les mesures politiques qui seront prises pour le modifier. Mais aussi un ensemble de mécanismes chimiques ou biochimiques complexes. Le dioxyde de carbone rejeté dans l'atmosphère, par exemple, n'est pas injecté dans un réservoir atmosphérique passif : il vient au contraire déstabiliser un système dynamique qui s'était équilibré au cours des derniers milliers d'années, où le carbone est en permanence recyclé entre la végétation continentale, l'océan et le phytoplancton. Actuellement le carbone correspondant au CO₂ produit par la combustion du charbon ou du pétrole représente environ 5 à 6 Gigatonnes (Gt, milliards de tonnes) par an auquel s'ajoute la part de la déforestation, beaucoup plus difficile à évaluer car elle est partiellement compensée par une repousse de la végétation, mais qui est de l'ordre d'1 Gt. s'accumule dans l'atmosphère. Seule la moitié de ce carbone reste dans l'atmosphère, où il augmente d'environ 3 Gt par an. Le reste est repris par l'océan, ou la végétation continentale. Dans le futur toutefois, comme nous le verrons plus loin, cette situation peut changer, si

l'efficacité de ces puits océaniques et biosphériques se trouve modifiée par le changement climatique.

L'effet de serre

Si la croissance de ces gaz – par ailleurs peu toxiques- pose problème, c'est parce qu'elle amplifie un effet naturel tout à fait remarquable, que l'on désigne sous le nom d'effet de serre. Ce processus fait jouer un rôle considérable aux gaz minoritaires de l'atmosphère (vapeur d'eau, dioxyde de carbone, méthane, ozone) : en empêchant le rayonnement infrarouge terrestre de quitter librement la planète, ils maintiennent suffisamment de chaleur près du sol pour rendre la planète habitable (elle aurait autrement une température moyenne de -18 degrés). A un effet de serre naturel, vient donc s'ajouter un effet de serre additionnel, lié aux activités humaines, dont on peut calculer l'amplitude de manière assez précise. L'effet de l'augmentation déjà acquise des gaz à effet de serre est de 2.4 Wm^{-2} . Un doublement du CO_2 nous conduirait (ou plus exactement nous conduira, puisque nous avons vu que cette échéance est presque inéluctable) à 4 Wm^{-2} . Ces chiffres peuvent paraître faible comparé au fonctionnement général de la machine climatique: le rayonnement solaire moyen absorbé au sommet de l'atmosphère, qui met en route le système climatique, est de 240 Wm^{-2} , et la perturbation anthropique est donc une perturbation au centième de la machine thermique « Planète Terre ». Mais si l'on songe que la température de notre planète est de 300 degrés absolus (ou Kelvin), cette modification est suffisante (comme nous le vérifierons à l'aide de modèles détaillés) pour modifier la température en surface de quelques degrés, ce qui est considérable, puisque seuls 5 à 6 degrés, par exemple, nous séparent d'un âge glaciaire. Il s'agit donc d'une perturbation forte du climat généralement très stable que nous avons connu depuis 8 à $10\,000$ ans.

La nécessité de la modélisation

Si l'on veut préciser l'amplitude ou les caractéristiques de cette évolution future du climat, le seul recours est la modélisation numérique. La réponse du système climatique à l'augmentation de l'effet de serre dépend très largement de mécanismes complexes : un réchauffement par exemple, augmente la quantité de vapeur de l'atmosphère, ce qui amplifie l'effet de serre ; il fait aussi fondre la neige, ou la glace, qui vont moins réfléchir le rayonnement solaire. La composante dont le rôle est sans doute le plus difficile à apprécier est certainement la couverture nuageuse, qui peut réfléchir le rayonnement solaire, et donc refroidir la planète, mais qui crée aussi un effet de serre important, et est le lieu d'un important réchauffement associé à la condensation de l'eau.

Les modèles numériques sont une tentative de créer une planète virtuelle, régie par des systèmes d'équations qui représentent l'ensemble de ces processus : équations thermodynamiques liées au rayonnement solaire ou terrestre, équations dynamiques permettant de décrire l'évolution des courants océaniques ou de la circulation atmosphérique.

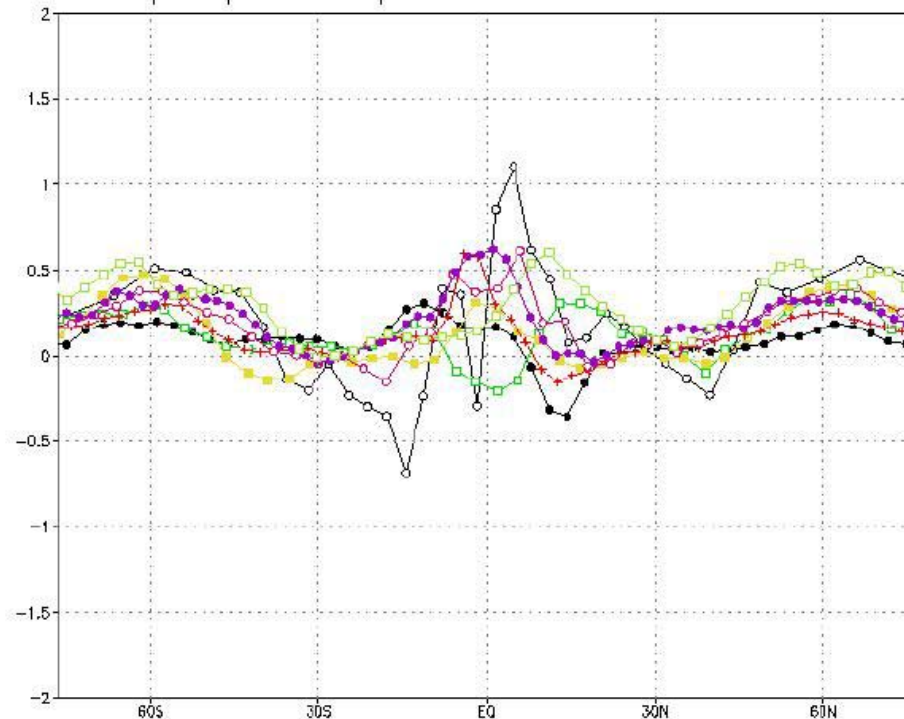
Au fil des années ces modèles sont parvenus à représenter de manière particulièrement réaliste le fonctionnement de notre planète : sous le seul effet des équations fondamentales de la physique, il est possible de simuler tous les grands modes de variabilité du climat : cycles saisonniers, moussons, alizés, jets atmosphérique, Gulf Stream, et même (encore imparfaitement) certains modes d'oscillations naturelles tels que les événements El Niño. Une fragilité conceptuelle de ces modèles tient au fait que pour résoudre les équations physiques sur lesquels

ils se fondent, il faut se donner un maillage : les vents ou les courants, la température, la vapeur d'eau, les nuages, la salinité de l'eau océanique, tout est calculé aux nœuds d'un réseau assez lâche : quelques centaines de kilomètres selon l'horizontale, de l'ordre du kilomètre selon la verticale. La conception même des modèles repose ainsi sur l'idée que, pour les vents atmosphériques et les courants océaniques, la partie « grande échelle » de l'écoulement, qui s'organise à l'échelle de centaines ou de milliers de kilomètres, est dominante et suffit à déterminer (au moins de manière statistique) le rôle des échelles plus petites, et en particulier celles qui sont actives dans la formation des nuages, ou dans l'interaction avec la surface ou avec les côtes. Cette hypothèse apparaît généralement bien vérifiée, mais dans certaines limites, limites qui constituent une première source d'incertitude, d'ordre fondamental, affectant les résultats des modèles. Certains des mouvements qui sont ainsi représentés de manière simplifiée (« paramétrique »), par exemple les mouvements convectifs associés à la formation des cumulonimbus, comptent parmi ceux qui contrôlent le plus fortement la stratification verticale de l'atmosphère (ou de l'océan), c'est à dire la répartition verticale des températures, de l'humidité de l'air ou de la salinité de l'eau. Ces changements de stratification verticale jouent un rôle important dans la réponse climatique à l'effet de serre. Mais, même ainsi limités à un maillage encore grossier, les modèles climatiques saturent la puissance des ordinateurs les plus rapides et il n'existe pour le moment pas d'autre issue au problème. Dans le futur proche, toutefois, la situation pourrait évoluer : les machines d'une puissance de plusieurs dizaines de Teraflops qui sont annoncées au Japon ou aux Etats-Unis pourraient permettre de réaliser un saut qualitatif, en résolvant explicitement certains mouvements convectifs dans des modèles globaux de la circulation atmosphérique.

Quand on soumet ces planètes numériques à un effet de serre plus intense, elles réagissent toutes par une augmentation de la température moyenne. Cette augmentation est plus marquée vers les Pôles que dans les régions intertropicales où la convection atmosphérique, en transportant la chaleur du sol vers les hautes couches de l'atmosphère, joue un rôle limitant. Elle s'accompagne d'une modification importante des régimes de précipitation, qui est au contraire plus marquée dans les régions de basse latitude. La sensibilité du cycle hydrologique à une augmentation de température est en effet plus grande dans des régions qui sont déjà plus chaudes. Au delà de ces grands éléments de convergence, il peut y avoir aussi des différences notables entre modèles, qui correspondent pour une large part au traitement varié des effets de petite échelle que nous avons signalés plus haut, et en particulier à la représentation des nuages. Dans les scénarios les plus classiques où l'on considère une augmentation du CO₂ de 1 % par an (ce qui correspond à une extrapolation simple des tendances actuelles, si l'on confond le rôle de tous les gaz à effet de serre dans un « équivalent CO₂ »), l'augmentation de la température moyenne vers 2050 peut varier de 1 à 3 degrés environ selon les modèles. La figure 1 montre le type d'accord que l'on peut attendre des modèles pour un champ particulièrement délicat à prédire, ou pourtant particulièrement important au niveaux des conséquences potentielles d'un changement climatique : le taux de précipitations. L'ensemble des modèles prévoit une activation du régime hydrologique, qui se marque par des régions humides plus humides – dans la zone équatoriale ou aux moyennes latitudes- et des régions sèches plus sèches – dans les régions subtropicales, vers 30°N ou 30°S. Mais cet effet moyen se traduit de manière quantitativement différente selon les modèles et les variations régionales peuvent être considérables.

L'océan, du fait de son énorme capacité calorifique, joue un rôle très différent, qui affecte en particulier la vitesse avec laquelle les changements climatiques peuvent se produire –parce que c'est le temps nécessaire pour chauffer les couches superficielles de l'océan qui donne le délai essentiel - et leur éventuelle irréversibilité. En effet l'océan, qui met plusieurs décennies à se réchauffer de manière significative, en mettra tout autant à se refroidir si l'on diminue les émissions de gaz à effet de serre. Mais il y a plus : la circulation océanique elle-même peut changer. La force inhabituelle des manifestations du phénomène El Nino au cours de cette fin de siècle pose le problème (encore non résolu) de son lien éventuel avec le début de réchauffement de la planète. Tous les modèles montrent également, dans le cas d'un réchauffement climatique, un ralentissement de la circulation océanique dans l'Atlantique Nord. Le moteur de cette circulation est la capacité des eaux de l'Atlantique Nord, près de l'Arctique, à plonger et former des eaux profondes. Cette propriété est liée à la salinité des eaux, qui tend justement à diminuer dans un climat plus chaud, par augmentation des précipitations. Tout d'abord cette évolution complique la prédiction de ce qui peut se passer sur l'Europe, où le climat pourrait se refroidir, même dans les conditions d'un réchauffement global. Mais, de plus, certains modèles peuvent aller jusqu'à un arrêt presque complet de la formation d'eau profonde, évolution rapide et catastrophique qui ressemble à ce qui a pu être observé dans le passé au moment des débâcles glaciaires : l'océan est alors attiré par un autre état d'équilibre que celui dans lequel il se trouve actuellement. Ceci pose un problème nouveau : pour certains modèles, donc, le système climatique pourrait être caractérisé par certains seuils (situés en l'occurrence vers le triplement ou quadruplement du CO₂), seuils mal connus, difficiles à évaluer dans l'état actuel de la science, mais au delà duquel les évolutions climatiques pourraient devenir brutales et irréversibles. Il s'agit d'une forme d'un risque plus difficile à prendre en compte, au niveau de la réponse politique, que les incertitudes présentées précédemment qui portaient seulement sur l'amplitude du processus.

Changement de précipitations pour un doublement du CO₂ atmosphérique



GrADS: COLA/IBES

Figure 1 : Changement des précipitations moyennes pour un ensemble de modèles soumis à un doublement du CO₂ atmosphérique (LeTreut and McAvaney, 2000)

Des modèles encore incomplets

Au cours des dernières années la construction des modèles climatiques a accompli des progrès considérables : les modèles d'abord purement atmosphériques ont intégré une représentation de plus en plus complexe des océans, puis de la glace de mer. Cette démarche vers une représentation toujours plus complexe et plus complète du système climatique est tout à fait fondamentale. Mais cette évolution est loin d'être achevée. Il existe par exemple un couplage étroit entre les cycles chimiques et biochimiques qui contrôlent la composition chimique de l'atmosphère et le climat lui-même. Pour reprendre l'exemple du cycle du carbone que nous avons décrit au début, des simulations réalisées à l'IPSL à Paris, ou au Hadley Centre en

Angleterre, montrent que l'océan ou la végétation reprennent moins de CO₂ à l'atmosphère dans un monde plus chaud. Le réchauffement lié à l'effet de serre a aussi pu être masqué dans la période initiale par l'émission de poussières ou d'aérosols qui refroidissent le système climatique (mais qui ne s'accumulent pas dans l'atmosphère, et ne remettent pas en cause les grandes lignes des prévisions que nous venons de décrire). Pour prendre en compte ces effets les modèles évoluent : purement physiques au départ ils se compliquent peu à peu de modules chimiques, biochimiques, et leur complexité se rapproche peu à peu de la complexité du monde réel.

Les conséquences les plus redoutées des changements climatiques ne sont pas non plus toutes prédites de manière directe par les modèles, mais s'en dérivent par une étape supplémentaire du raisonnement. Par exemple, la dilatation de l'océan, la fonte des glaciers de montagnes devraient conduire à une élévation du niveau des mers de quelques dizaines de centimètres vers le milieu du siècle prochain. La fréquence et l'intensité des cyclones tropicaux pourraient aussi être modifiée. Nous savons que ces cyclones ne se développent qu'au-dessus des eaux à plus de 27°C. Il est difficile de faire une prévision exacte : mais on peut penser que des régions qui ne sont pas habituellement touchées par les cyclones le seront dans un futur proche, ou que l'intensité des cyclones pourrait changer (par exemple : moins de cyclones, mais plus intenses). D'une manière générale, il est bien sûr très important d'estimer les conséquences régionales des changements climatiques, et des événements extrêmes qui peuvent y être associés. Ces conséquences sont nécessairement d'essence statistique, et ne peuvent pas non plus être décrites de manière explicite par les modèles. On essaie donc –avec des succès encore variés– de les associer à l'évolution d'indices climatiques, qui ont correspondent à une description de la circulation à grande échelle de l'atmosphère, et peuvent être prédits par les modèles. Sur l'Europe par exemple, une grande part de la variabilité organisée du climat, et en particulier un certain nombre des événements régionaux de forte amplitude (tempêtes récurrentes, hivers anormalement froids) sont associés à l'évolution de ce que l'on appelle indice de l'oscillation Nord-atlantique (en anglais : NAO), qui correspond à une différence de pression au niveau de la mer entre les villes de Lisbonne et Reyjavick, et caractérise l'intensité relative de l'Anticyclone des Açores et de la Dépression d'Islande. Depuis quelques années cet indice augmente (irrégulièrement), ce qui correspond aussi à ce que prédisent la plupart des modèles pour un réchauffement du climat.

Conclusion

Si l'on essaie de synthétiser tous ces éléments, on peut considérer que le rôle de la modélisation tout au long des dernières années a été de fournir un cadre aussi rigoureux et contraignant que possible, pour explorer les futurs possibles de la planète. L'idée de départ est très simple : l'augmentation de gaz tels que le dioxyde de carbone ou le méthane crée un effet de serre qui peut amener un réchauffement de quelques degrés. Comme nous l'avons vu un argument physique de « bon sens » donne ce résultat – et c'est un calcul qu'avait déjà fait Arrhénius au début du siècle. Mais le fonctionnement de notre planète est très complexe et l'enjeu de nos recherches a été de déterminer si cette complexité peut permettre de renverser l'idée simple que l'on peut se faire initialement du problème. La réponse, après deux décennies d'études réalisées en parallèle dans une quinzaine de laboratoires, est toujours que, dans le cadre fortement contraint par les équations fondamentales de la physique fournies par les modèles, le système climatique est inévitablement appelé à se réchauffer : seul le spectre des futurs possibles

s'est un peu élargi – plutôt dans un sens d'aggravation possible des risques. Cette convergence qualitative des modèles est un élément tout à fait remarquable, et, de ce point de vue, l'incertitude qui entoure encore leur prédiction reflète de moins en moins l'ignorance des scientifiques, et de plus en plus un facteur de risque lié à la complexité d'un monde réel qui n'est pas entièrement prévisible.

Par ailleurs plus que l'amplitude des changements climatiques à venir (qui sont moins importants que ce que la planète a pu connaître au moment des âges glaciaires par exemple) c'est la rapidité avec laquelle ils peuvent survenir qui constitue le facteur de risque majeur, et qui impose que des mesures soient prises dès maintenant. Depuis le début du siècle la température globale a augmenté de 0,6 à 0,9°C. Si cette évolution continue les dernières ambiguïtés qui subsistent se lèveront d'elles-mêmes. Mais il sera bien tard pour intervenir.

References:

Friedlingstein, P., L. Bopp, P. Ciais, J.-L. Dufresne, L. Fairhead, H. Le Treut, P. Monfray, and J. Orr: Positive feedbacks of the carbon cycle on future climate change (submitted)

IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change), 1990: Climate Change: the IPCC Scientific Assessment, J.T. Houghton, G.J. Jenkins and J.J. Ephraums (eds), Cambridge University Press, Cambridge, UK, 356pp

IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change), 1994: Climate Change 1994: Radiative Forcing of Climate Change and an Evaluation of the IPCC IS92 Emission Scenarios, J.T. Houghton, L.G. Meira Filho, J. Bruce, Hoesung Lee, B.A. Callander, E. Haites, N. Harris and K. Maskell (eds), Cambridge University Press, Cambridge, UK, 339 pp.

IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change), 1995: Climate Change 1995: The science of Global Change, J.T. Houghton, L.G. Meira Filho, B.A. Callander, N. Harris, A. Kattenberg, and K. Maskell, Cambridge University Press, Cambridge, UK, 572 pp.

Le Treut and McAvaney, 2000: A model intercomparison of equilibrium climate change in response to CO₂ doubling, IPSL Note N°18, Institut Pierre Simon Laplace, Paris.

Li Z.X., Le Treut H., 1992: Cloud-radiation feedbacks in a general circulation model and their dependence on cloud modelling assumptions. *Climate Dynamics*, 7, 133-139, 1992.

Manabe, S. and R.J. Stouffer, 1994: Multiple-century response of a coupled ocean-atmosphere model to an increase of atmospheric carbon dioxide. *J. Climate*, 7, 5-23.

Penner, J. E., R. J. Charlson, J. M. Hales, N. S. Laulainen, R. Leifer, T. Novakov, J. Ogren, L. F. Radke, S. E. Schwartz, and L. Travis, 1994: Quantifying and minimizing uncertainty of climate forcing by anthropogenic aerosols, *Bull. Am. Met. Soc.*, 75, 375--400.

Roeckner, E., T. Siebert, and J. Feichter, 1995: Climatic response to anthropogenic sulfate forcing simulated with a general circulation model. *Aerosol Forcing of Climate*, R. Charlson and J. Heintzenberg (Eds.), pp. 349--362, John Wiley and Sons.

Santer, B. D., K. E. Taylor, T. M. L. Wigley, J. E. Penner, P. D. Jones, and U. Cubasch, 1995: Towards the detection and attribution of an anthropogenic effect on climate, *Clim. Dyn.*, 12, 77--100.

Schlesinger M.E. and J.F.B. Mitchell, 1987: Climate model simulations of the equilibrium climatic response to increased carbon dioxide, *Rev. Geophys.*, 25, 760-798.

Senior, C.A. and J.F.B. Mitchell, 1993: Carbon dioxide and climate: The impact of cloud parameterization, *J. Climate*, 6, 393-418.