

SCIENCE & DEVENIR

de l'Homme

De 1860 à nos jours, la concentration en dioxyde de carbone (CO₂, encore appelé gaz carbonique) dans l'atmosphère de la planète a augmenté de 25 %. Mais cette augmentation serait deux fois plus importante si tout le CO₂ émis par les activités humaines restait dans l'atmosphère. Une large fraction est réabsorbée par la biosphère et par les océans. La biosphère continentale et les océans continueront-ils à être aussi efficaces ? Le changement climatique annoncé sera-t-il amplifié ?

CYCLE DU CARBONE ET CLIMAT UNE ACCELERATION DES CHANGEMENTS CLIMATIQUES ?

Pierre FRIEDLINGSTEIN & Jean-Louis DUFRESNE
chargés de recherche au CNRS respectivement au Laboratoire des Sciences et du Climat et de l'Environnement et au Laboratoire de Météorologie dynamique

LE CYCLE DU CARBONE

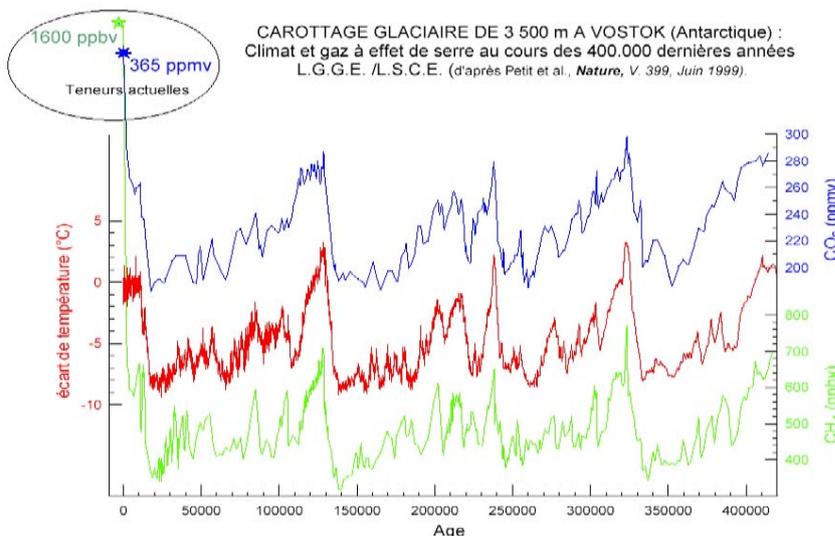
De nombreux éléments constituant la matière de notre planète connaissent des cycles qui, comme celui de l'eau, les font passer d'un endroit à l'autre, d'un état à l'autre, avant de les faire revenir à leur point de départ. Le carbone fait partie de ces éléments.

Lâché dans l'atmosphère par les organismes vivants, les volcans ou les incendies de forêt sous la forme de

molécules de CO₂, il est capté grâce à la photosynthèse* par les plantes et le phytoplancton* ou par les océans dans lesquels il se dissout. On donne le nom de « sources » aux entités responsables du carbone relâché et celui de « puits », aux entités grâce auxquelles il est à nouveau absorbé. Lorsque la situation est quasi-équilibrée, la quantité de carbone relâchée

est pratiquement identique à celle captée. Ainsi, au cours des derniers millénaires (de -10 000 ans jusqu'au XVIII^e siècle), on constate que la concentration de CO₂ dans l'atmosphère est demeurée constante, ce qui traduit un cycle du carbone proche de l'équilibre.

Sur des périodes de temps plus longues (quelques centaines de milliers



CAROTTAGE GLACIAIRE DE 3 500 m A VOSTOK (Antarctique) : Climat et gaz à effet de serre au cours des 400.000 dernières années L.G.G.E. /L.S.C.E. (d'après Petit et al., *Nature*, V. 399, Juin 1999).

Variations des concentrations du gaz carbonique (courbe du haut) et du méthane (courbe du bas) au cours des 420 000 dernières années.

Ces deux courbes combinent les mesures effectuées au LGGE-Grenoble sur les bulles extraites de la glace du forage antarctique de Vostok, les mesures réalisées sur d'autres forages et, pour les dernières décennies, des prélèvements atmosphériques.

La courbe du milieu correspond aux variations de la température en Antarctique estimée à partir de l'analyse de la teneur en deutérium de la glace. (LSCE-Saclay)

Figure adaptée de Petit et al. (Nature, 1999) et, pour la partie récente, des rapports IPCC (1995 et 2001).

d'années), on observe une variation de la concentration du CO₂ dans l'atmosphère (ainsi que celle d'autres gaz tels que le méthane, CH₄) concomitante aux variations de la température de surface de la Terre. Pendant les périodes glaciaires, alors que la température moyenne baisse de 5°C environ, la concen-

tration de CO₂ baisse de 80 ppmv* environ.

Aujourd'hui, on considère que les variations des positions relatives de la Terre et du Soleil, qui induisent une variation du flux solaire, sont à l'origine des différentes glaciations. Les changements climatiques (température, pluie, circulation

océanique...) modifient le cycle du carbone qui atteint ensuite un nouvel équilibre, avec une nouvelle valeur de la concentration de CO₂ atmosphérique. Le cycle du carbone varie également sur des constantes de temps supérieur au million d'années, en suivant les variations géologiques.

L'ACCROISSEMENT DE CO₂ DEPUIS 200 ANS ET SON INFLUENCE SUR LE CLIMAT

La révolution industrielle s'est accompagnée d'un fort accroissement de la consommation énergétique, d'abord par la combustion de bois et de charbon, puis par celle de pétrole à partir du début du XX^e siècle. Elles se traduisent par un accroissement de la concentration de CO₂ atmosphérique. Celle-ci accroît la fixation du carbone par les plantes et la dissolution du CO₂ dans l'océan. Finalement, on constate que, sur la quantité totale de CO₂ émis par l'homme, la moitié seulement reste dans l'atmosphère, l'autre moitié étant captée par les puits naturels, une moitié environ par la biosphère continentale (c'est-à-dire les écosystèmes), l'autre par l'océan. Or, le CO₂ est le deuxième gaz à effet de serre après la vapeur d'eau. Au cours du XIX^e siècle, les scientifiques ont montré que la température de la surface de la Terre dépendait principalement de deux phénomè-

nes : l'absorption du rayonnement solaire (ce qui apporte de l'énergie à la Terre) et l'émission de rayonnement infrarouge (ce qui lui fait perdre de l'énergie).

En faisant l'analogie avec ce qui se passe dans une serre horticole, Joseph Fourier émit le premier l'hypothèse que l'absorption du rayonnement infrarouge par l'atmosphère réduisait les pertes d'énergie par rayonnement de la surface ce qui conduisait à augmenter sa température : c'est l'effet de serre.

Les principaux constituants absorbant le rayonnement infrarouge furent ensuite identifiés comme étant la vapeur d'eau et le dioxyde de carbone, et les scientifiques en déduisirent logiquement qu'une variation de la concentration de ces deux constituants entraînait une variation de la température de la Terre.

En 1896, Svante Arrhenius fut le premier à quantifier ces effets.

Il estimait qu'une réduction de CO₂ de 30 % entraînerait un refroidissement de 3 °C environ, et qu'un doublement de sa concentration entraînerait un réchauffement de 5 °C. Cent ans plus tard, ces chiffres sont toujours d'actualité...

Depuis 150 ans, la concentration observée du CO₂ atmosphérique a augmenté de 25 % environ (80 ppmv) et la température moyenne de la Terre a augmenté de 0,8 °C environ.

D'après les modèles climatiques actuels, cet accroissement de température serait plus élevé encore si l'accroissement des gaz à effet de serre était la seule perturbation anthropique.

Mais la combustion s'accompagne d'un accroissement de la concentration des aérosols sulfatés dans l'atmosphère, aérosols qui réfléchissent le rayonnement solaire et refroidissent légèrement la Terre.

ÉVOLUTION FUTURE DU CLIMAT

Pour quantifier les possibles futurs changements climatiques, les climatologues ont d'abord utilisé des situations idéalisées. Quels seraient les changements climatiques si la concentration de CO₂ doublait ? Ou bien, si la concentration de CO₂ augmentait de 1 % par an (ce qui conduit à un doublement tous les 70 ans) ? Ces conditions sont appliquées à des modèles climatiques qui représentent l'atmosphère, les surfaces continentales, l'océan, la glace de mer, les calottes polaires... Les modèles atmosphériques sont du même type que ceux utilisés en prévision du temps. En plusieurs milliers de points à la surface de la Terre, ils calculent l'évolution de la pression, du vent, de la pluie, des nuages... toutes les heures environ et cela pendant des années (jusqu'à plusieurs centaines ou milliers).

Ces calculs résolvent des phénomènes physiques bien connus (équation du mouvement, échanges par rayonnement solaire ou infrarouge...) ou moins bien connus (formation des gouttes d'eau ou des particules de glace des nuages, accretion de ces gouttes pour former la pluie, structure tridimensionnelle de la turbulence atmosphérique...). De même, les modèles d'océan calculent l'évolution des courants marins, de la température, de la salinité... Tous ces modèles interagissent ensemble. Avec ces modèles climatiques, on peut alors réaliser deux simulations dans lesquelles la concentration de CO₂ reste constante dans l'une et varie dans l'autre. La différence de climats ainsi simulés permet d'obtenir la sensibilité du climat à une variation de la concentration en CO₂.

Par exemple, on détermine que, pour un doublement de CO₂, la température moyenne de la Terre augmente de 2°C à 5°C selon les modèles. En ce qui concerne la répartition géographique, les résultats font apparaître que :

- la température de surface augmentera davantage aux hautes qu'aux basses latitudes et davantage sur les continents et sur la glace de mer que sur les océans ;
- les précipitations augmenteront dans les régions équatoriales et aux moyennes et hautes latitudes ; elles diminueront dans les régions subtropicales ;
- le volume de glace de mer en Arctique diminuera (typiquement de 35 % dans 50 ans) sans qu'une telle décroissance ne se retrouve en Antarctique.

COUPLAGE DU CLIMAT ET DU CYCLE DU CARBONE

Dans les simulations ci-dessus, l'évolution de la concentration de CO₂ était prescrite. Mais dans la réalité, cette évolution dépend de la différence entre les émissions dues aux activités humaines et l'absorption par les puits océaniques et biosphériques* de carbone. Ces puits, à leur tour, dépendent de la concentration de CO₂ et également du climat.

L'étape suivante est donc de réaliser des simulations dans lesquelles le climat et le cycle du carbone interagissent entre eux.

Des premières simulations couplées de ce type ont été réalisées en 2000 (notamment à l'Institut Pierre-Simon Laplace). En utilisant les émissions de CO₂ estimées de 1860 à 2000, puis les émissions correspondant à un scénario dans lequel aucune mesure importante n'est prise dans le futur pour réduire les émissions de CO₂, les résultats obtenus sont synthétisés sur la figure ci-contre.

On y voit l'accroissement important à la fois de la concentration de CO₂ et de la température moyenne de la Terre. On peut également étudier spécifiquement l'importance de ce couplage entre le climat et le cycle du carbone, en créant une simulation « découplée » ; elle utilise les mêmes émissions de CO₂ que la précédente, mais le cycle du carbone est cette fois insensible aux changements climatiques. En la comparant au scénario dans lequel ils sont couplés, on peut estimer l'influence du changement climatique sur la modification des puits naturels de carbone et donc sur le CO₂ atmosphérique et le changement climatique. Il apparaît que :

- le changement climatique futur a pour effet de réduire les puits de CO₂

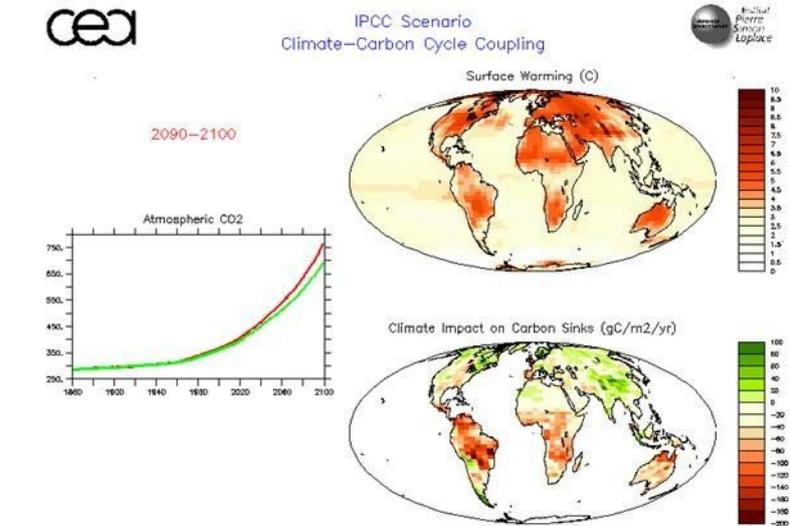


Figure : Résultats de la simulation couplée climat-carbone (IPSL). Les courbes montrent la simulation de l'évolution de la concentration atmosphérique de gaz carbonique dans le cas où les rétroactions entre le cycle du carbone sont considérées (courbe rouge) par rapport au cas où elles sont négligées (courbe verte). La carte du haut représente le changement de température simulé en 2100 par rapport à l'époque pré-industrielle ; la carte du bas montre l'impact du changement climatique sur les puits de carbone continental pour la même période.

ce qui entraîne une augmentation plus rapide du CO₂ atmosphérique ; en 2100, la concentration de CO₂ atteint 780 ppmv pour la simulation couplée, alors qu'il n'atteint que 700 ppmv pour la simulation découplée.

- dans le cas d'un climat constant, les puits naturels continuent à croître dans le futur sous l'effet de l'augmentation du CO₂,
- par contre, dans le cas d'un climat réchauffé (car couplé à l'augmentation du CO₂ atmosphérique), on constate l'effet contraire : les puits biosphériques ont tendance à saturer voire à diminuer dans les régions équatoriales et sub-tropicales d'Afrique et d'Amérique, alors qu'ils ont tendance à augmenter dans les hautes latitudes. La diminution des puits tropicaux s'explique par une augmentation de la température et donc de l'évaporation qui entraîne à son tour une augmentation de

l'aridité des sols et réduit fortement la photosynthèse des écosystèmes tropicaux. A contrario, l'augmentation de la température profite à la végétation dans les hautes latitudes. Globalement, l'effet tropical domine et le puits biosphérique global est réduit dans la simulation couplée.

- Au niveau de l'océan, on assiste à deux effets antagonistes. D'une part, l'effet direct du changement climatique est de réduire les puits océaniques (principalement suite à une stratification de l'océan de surface), mais d'autre part, la forte réduction du puits biosphérique entraîne une augmentation de la concentration de CO₂ dans l'atmosphère qui induit une augmentation des flux de CO₂ vers les océans, augmentant ainsi le puits océanique. Dans la simulation, ces deux effets se compensent durant le XXI^e siècle.

CONCLUSION

A l'horizon 2100, la prise en compte du couplage entre le réchauffement de l'atmosphère et l'évolution des puits biosphérique et océanique induit un accroissement additionnel du taux de CO₂ atmosphérique d'environ 20 %. Ce second accrois-

sement provoquera également une augmentation d'environ 20 % du réchauffement de la planète. Les conséquences de ces deux accroissements, qui se nourriront l'un l'autre, ne seront pas uniformément répartis sur la Terre. Les hautes lati-

tudes verront leurs puits de carbone s'accroître, alors que les puits des régions équatoriales et tropicales iront s'affaiblissant.

Au final, c'est donc bien la totalité du fragile équilibre planétaire qui est en jeu.



à réfléchir

Depuis une dizaine d'années, la conscience d'une modification du climat a soulevé de nouveaux enjeux dans de nombreux pays et déplacé les préoccupations classiques des sociétés. Le Sommet de la Terre (Rio, 1992) a donné pour la première fois une dimension politique à la préservation de la planète et a conduit à la mise en place de la Convention Climat (1992 à 1994). Les premiers objectifs de réduction de gaz à effet de serre (protocole de Kyoto 1997, entré en vigueur le 16 février 2005) ont été chiffrés. Les difficultés rencontrées à La Haye (2000) et à Bonn (2001) pour mettre en oeuvre ces décisions constituent les premières étapes de négociations complexes.

Comment peut-on appliquer, à tous les pays, les conventions minimales décidées dans ces assemblées plénières ? Comment convaincre tous les pays de la nécessaire application de ces décisions ? Comment effectuer des contrôles sûrs ? Qui doit être le gendarme ? Selon quels critères ? Quelles peuvent être les sanctions à appliquer aux mauvais élèves ? Peut-on laisser aux pays les plus riches la possibilité d'acheter aux plus pauvres leurs « bons de pollutions » ? Les pays pauvres ou émergents doivent-ils être aussi bridés que les pays occidentaux alors que, pour eux, tout reste à faire pour se développer ?

Les scientifiques tiennent une place importante dans le débat, mais comme les décisions à prendre remettent en cause nos schémas de croissance, de consommation et accentuent encore les clivages Nord - Sud, l'enjeu dépasse la seule communauté scientifique. C'est au politique, aux Etats, aux collectivités territoriales, aux industriels, aux syndicats, aux associations et donc, aux citoyens à qui il revient de porter les décisions :

Quelles possibilités d'actions avons-nous, tant au niveau individuel qu'au niveau collectif ?

Quels sacrifices sommes-nous prêts à faire ?

Est-il nécessaire de disposer d'une automobile par adulte ?

Pouvons-nous multiplier les transports aériens pour aller plus vite, plus loin ? Jusqu'à quel niveau accepterons-nous de limiter nos émissions de gaz polluants ?

Quels peuvent être les coûts humains et financiers ?

Quelles recherches technologiques permettront économie et meilleur usage de l'énergie ?

Biosphère :
ensemble de tous les écosystèmes de la planète, c'est-à-dire tous les êtres vivants et les milieux qui les abritent.

Flux solaire :
puissance du rayonnement solaire reçu.

Photosynthèse :
réaction se déroulant chez les plantes où l'énergie solaire est utilisée pour oxyder l'eau et réduire le CO₂ afin de synthétiser des substances organiques.

Phytoplancton :
algues marines généralement photosynthétiques de très petite taille (inférieure à 50 microns).

ppmv :
abréviation de « partie par million en volume », dire qu'il y a 300 ppmv de CO₂ dans l'air veut dire que dans un volume de 1m³ d'air, il y a un volume de 300/1 000 000 de CO₂.

ppbv :
abréviation de « partie par milliard en volume ».

ISSN : 1021 7711



Bibliographie

- *Le climat : jeu dangereux*.
Jean Jouzel et Anne Debroise, Ed. Dunod, 2004.

- *L'avenir climatique*, Jean-Marc Jancovici, Seuil 2005

- *Le climat est-il devenu fou ?*, Robert Sadourny, éditions Le Pommier, Paris, 2002.

- *Le changement climatique*, Guy Jacques et Hervé Le Treut, éditions UNESCO, 2005

- *Climat d'hier à demain*, Sylvie Joussaume, CNRS éditions/CEA, Paris, 2000.



Webographie

- Le climat dans les dossiers « SAGASCIENCE » du CNRS :

<http://www.cnrs.fr/saga.htm>

- Le site de Jean-Marc Jancovici :

<http://www.manicore.com>

- La Mission interministérielle de l'effet de serre :

<http://www.effet-de-serre.gouv.fr/>

- Le site web

d'Environnement Canada : <http://www.ec.gc.ca/climate/home-f.html>

- Institut Pierre-Simon Laplace :

<http://www.ipsl.jussieu.fr>

Vous pouvez télécharger directement la lettre sur le site du murs à l'adresse : www.murs-france.asso.fr



Président
N. Sarkozy
Vice-Président
J. Baylet
Président
L. Dégos
Président
D. Buisson
Vice-Président
P. Ciseau
Président
M. Delella
Vice-Président
A. Kohn
Président
E. Kohn
Président
S. Mouchet

La Lettre est éditée avec le soutien du ministère délégué à la Recherche