

L'effet de serre

Aujourd'hui pratiquement plus personne ne conteste l'influence des activités humaines sur l'évolution de la température du Globe. Mais quelle connaissance a-t-on du processus en cause ?

Édouard Bard, professeur au Collège de France, est titulaire de la chaire de l'évolution du climat et de l'océan.

* La **convection atmosphérique** est le mélange provoqué par les différences de densité des masses d'air chaud et froid.

Qu'est-ce que l'effet de serre ?

En deux mots, c'est un réchauffement de la Terre, des océans et de l'atmosphère dû à la rétention, par un certain nombre de constituants atmosphériques, d'une partie de la chaleur induite par les rayons du Soleil. Pour bien comprendre de quoi il s'agit, il faut se remémorer quelques notions de physique du rayonnement électromagnétique. Tout corps émet un rayonnement dont l'intensité et la longueur d'onde principale dépendent de sa température. Ainsi, un objet tiède, comme un radiateur, émet des infrarouges. Le filament d'une lampe émet de la lumière visible, car il est porté à plusieurs milliers de degrés. Le Soleil aussi rayonne, principalement dans les longueurs d'onde visibles.

Le système Terre-atmosphère reçoit du Soleil un rayonnement incident moyen de 342 watts par mètre carré. La plus grande partie de ce flux d'énergie (environ 70 %) est absorbée soit par l'atmosphère (20 %), soit par la surface de la Terre (50 %), et transformée en chaleur [fig. 1]. La surface terrestre réémet un rayonnement infrarouge vers l'atmosphère. Or, plusieurs composants chimiques de celle-ci absorbent les infrarouges, puis les réémettent dans toutes les directions. Une partie retourne vers la surface terrestre, laquelle s'échauffe encore un peu plus : c'est l'effet de serre.

Celui-ci assure actuellement à la surface de la Terre une température moyenne de 15 °C. Sans lui, elle plongerait à environ - 18 °C. Il ne s'agit là que d'un ordre de grandeur global : pour calculer le changement de tempé-

rature en chaque point de la surface terrestre, il faudrait tenir compte des variations d'insolation liées à l'angle d'incidence des rayons du Soleil (différent selon la latitude et la saison).

La partie du rayonnement solaire qui n'est pas absorbée (environ 30 % au total) est directement réfléchiée par les nuages, les aérosols, l'atmosphère et la surface de la Terre : c'est l'albédo. Additionnée au rayonnement infrarouge qui ressort de l'atmosphère, cette partie compense exactement l'énergie reçue par les rayonnements solaires : le système Terre-atmosphère est en équilibre thermique.

L'effet de serre joue un rôle essentiel dans le climat. Depuis la convection atmosphérique* jusqu'aux courants marins, en passant par les calottes de glace, tous les éléments qui contrôlent le climat sont pilotés par le bilan radiatif et, par conséquent, par l'effet de serre.

Qui a découvert le phénomène ?

L'un des tout premiers savants à s'intéresser aux effets calorifiques du rayonnement solaire, au XVIII^e siècle, fut le genevois Horace-Bénédict de Saussure. On doit à ce naturaliste polyvalent, physicien, climatologue, géologue et alpiniste à ses heures un appareil, baptisé « héliothermomètre », qui est l'ancêtre du panneau solaire. Constitué d'une série de caisses emboîtées les unes dans les autres, isolées thermiquement et dont un côté est vitré, l'héliothermomètre peut faire bouillir de l'eau ou même cuire des aliments.



En 1824, le physicien français Joseph Fourier publia ses *Remarques générales sur les températures du globe terrestre et des espaces planétaires*. Il y exposa l'idée selon laquelle l'enveloppe atmosphérique du Globe se comporterait comme le vitrage d'une serre. Jacques Ebelmen, professeur à l'École des mines de Paris et administrateur de la Manufacture royale des porcelaines de Sèvres, fut quant à lui le premier à suggérer que des changements dans le cycle du carbone ont pu faire varier dans le passé la teneur atmosphérique en « acide carbonique » et, par voie de conséquence, le climat de la Terre. Voici ce que ce pionnier de la géochimie écrivit en 1845 : « *Plusieurs circonstances tendent à prouver qu'aux anciennes époques géologiques l'atmosphère était plus dense et plus riche en acide carbonique, et peut-être en oxygène, qu'à l'époque actuelle. À une plus grande pesanteur de l'enveloppe gazeuse devaient correspondre une plus forte condensation de la chaleur solaire, et des phénomènes atmosphériques d'une bien plus grande intensité.* »

Mais c'est au chimiste et ingénieur irlandais John Tyndall que l'on doit les premières données expérimentales sur l'absorption et l'émission des rayons infrarouges par les gaz. Il était par ailleurs convaincu de l'importance de l'effet de serre en climatologie : « *Cette vapeur d'eau est une couverture encore plus indispensable pour la végétation de l'Angleterre que les vêtements ne le sont pour un homme [...].* » Rejoignant Ebelmen, sans le savoir, Tyndall affirmait aussi que « *toutes les mutations du climat que les recherches des géologues révèlent peuvent être liées à des variations des teneurs atmosphériques en gaz à effet de serre* ».

Quels sont les principaux agents naturels à l'œuvre dans l'effet de serre ?

Ce sont des gaz dont la particularité est d'être transparents à la lumière visible mais opaques pour une majeure partie du rayonnement infrarouge émis par la Terre. Le taux d'absorption dépend du gaz considéré en raison de la structure électronique

des molécules qui le composent. Le rayonnement absorbé induit des vibrations ou des rotations des liaisons chimiques. Ce phénomène dépend de la nature des liaisons, de la géométrie des molécules et des masses relatives de leurs atomes.

Si elle n'entre que pour 0,3% dans la composition de l'atmosphère, la vapeur d'eau n'en est pas moins le principal gaz à effet de serre. L'examen de l'absorption et de l'émission des rayonnements par la vapeur d'eau a montré que celle-ci est responsable d'environ 60% de l'élévation de température par effet de serre. Sa durée de vie dans l'atmosphère est très courte : il faut moins de deux semaines pour qu'elle soit recyclée sous forme de pluie ou de neige.

Le deuxième gaz à effet de serre est le dioxyde de carbone (CO_2). Bien qu'en augmentation rapide en raison des activités humaines, il ne compte aujourd'hui que pour 0,0383% de l'atmosphère, soit 383 ppmv*, mais il est responsable d'environ 26% de l'effet de serre. Cette part globale est à peu près la

même, que l'on prenne ou non en compte les apports anthropiques.

Les autres principaux gaz à effet de serre, responsables globalement de 14% de l'élévation naturelle de la température, sont l'ozone (O_3), le méthane (CH_4) et le protoxyde d'azote (N_2O). Leurs teneurs actuelles sont encore plus faibles : respectivement 0,03 ppmv, 1,8 ppmv et 0,3 ppmv.

La conformation tétraédrique de la molécule de méthane lui laisse plus de latitude pour vibrer que la molécule linéaire de dioxyde de carbone. Aussi, le méthane – qui ne reste dans l'atmosphère qu'une dizaine d'années en moyenne – absorbe, pour chaque ppmv supplémentaire, 43 fois plus de rayonnement infrarouge que le gaz carbonique.

Le protoxyde d'azote, relativement stable, n'est repris ni par la biomasse ni par les océans. Il n'est dégradé que dans la haute atmosphère, à laquelle il ne parvient qu'au bout de plusieurs années : sa durée de vie moyenne dans l'atmosphère est estimée à environ un siècle. Il absorbe 253 fois plus de

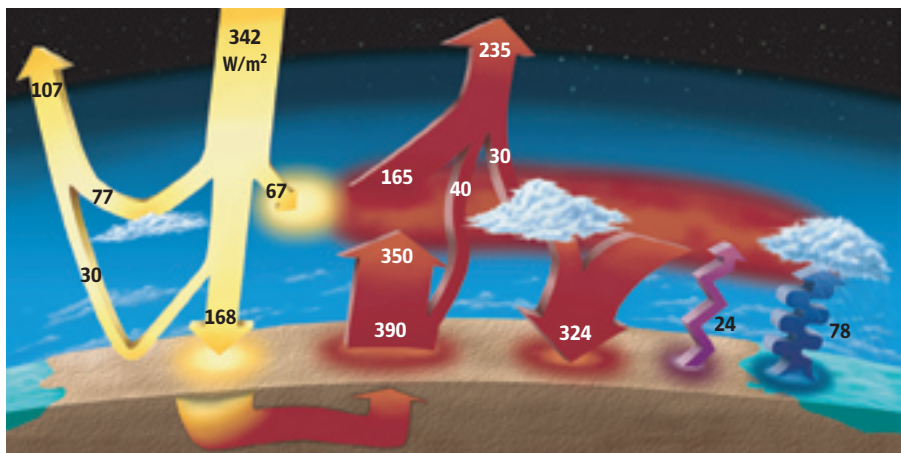
* Une **partie par million en volume (ppmv)** est égale à 0,0001 %.

Fig.1 Le bilan radiatif de la terre

LA TERRE REÇOIT EN MOYENNE 342 WATTS PAR MÈTRE CARRÉ

(W/m^2) sous la forme de rayons lumineux provenant du Soleil. Il s'agit d'une moyenne globale sur la surface sphérique du globe terrestre : 1 m^2 perpendiculaire aux rayons solaires reçoit en fait le quadruple, soit $1368 \text{ W}/\text{m}^2$. Le système Terre-atmosphère ayant atteint un équilibre thermique, le bilan

radiatif net est nul : au total $342 \text{ W}/\text{m}^2$ sont réémis. Sur les $390 \text{ W}/\text{m}^2$ de rayonnement infrarouge émis par la Terre, 350 sont réabsorbés par les gaz à effet de serre et les nuages. L'atmosphère (avec les nuages) rayonne des infrarouges vers le sol pour $324 \text{ W}/\text{m}^2$. Le bilan radiatif n'est pas équilibré pour l'atmosphère, qui émet plus ($165 + 30 + 324 = 519 \text{ W}/\text{m}^2$) qu'elle ne reçoit ($67 + 350 = 417 \text{ W}/\text{m}^2$). Ce déficit radiatif est compensé par des flux de chaleur liés aux changements de phase de l'eau (évaporation-condensation) et à des mécanismes de conduction et de convection thermique. © DR/D'APRÈS J.T. KIEHL ET K.E. TRENBERTH, *BULL. AM. MET. SOC.*, 78, 198, 1997.



rayonnement que le dioxyde de carbone. L'ensemble de ces gaz a été responsable d'un forçage radiatif – c'est-à-dire d'une modification du bilan radiatif terrestre par les activités humaines – de quelque 3 watts par mètre carré depuis 1850. Cette variation représente environ 1% de l'énergie moyenne reçue du Soleil.

L'effet de serre a-t-il déjà été plus important qu'aujourd'hui ?

Oui. L'effet de serre existe depuis la formation de l'atmosphère. Et il a probablement été très important pendant l'Archéen (– 4,5 à – 2,5 milliards d'années), où il compensait alors un faible flux énergétique du Soleil (l'éclairement solaire était moindre qu'aujourd'hui).

Plus près de nous, la Terre a joui d'un climat chaud à plusieurs reprises. Voici quelques exemples. Au Jurassique et au Crétacé (périodes qui s'étendent de – 200 à – 65 millions d'années et pendant lesquelles les dinosaures se sont épanouis), la température était environ d'une dizaine de degrés plus élevée qu'aujourd'hui. Une situation associée à une élévation des teneurs en CO₂ atmosphérique, et donc d'un renforcement de l'effet de serre. Des indicateurs géochimiques indirects (notamment des marqueurs isotopiques) témoignent en effet de concentrations en CO₂ trois fois supérieures à la concentration actuelle. Néanmoins, les reconstitutions sont encore peu précises, et les différentes techniques utilisées ne convergent pas toujours. Le climat s'est par la suite rafraîchi par à-coups jusqu'à la réapparition de périodes glaciaires.

Plus près de nous encore, la teneur en gaz carbonique a été similaire au niveau naturel actuel (280 ppmv sans les apports anthropiques) pendant quatre périodes interglaciaires : vers – 410 000, – 325 000, – 240 000 et – 125 000 ans. Des informations que les chercheurs ont obtenues en étudiant les bulles d'air emprisonnées dans les glaces de l'Antarctique (sites de Vostok et de Dome C).

La période chaude centrée vers – 125 000 ans (l'Eémien) est bien connue des paléoclimatologues : ils ont montré que les températures étaient généralement plus élevées qu'aujourd'hui d'environ 2° C, et que le niveau marin était d'environ 7 mètres au-dessus du niveau actuel. Pourtant, la

teneur en CO₂ était alors inférieure au niveau mesuré aujourd'hui, avec les apports anthropiques (383 ppmv en 2007). Selon la théorie formulée par l'astronome serbe Milutin Milankovitch dans les années 1920, ces changements de climat sont provoqués par les variations de la répartition de l'insolation dues aux changements des paramètres de l'orbite terrestre : celles de la teneur des gaz à effet de serre constituent des rétroactions du système climatique, renforçant encore le phénomène de glaciation.

Pourquoi l'effet de serre a-t-il fluctué ?

À l'échelle du million d'années, la fluctuation de l'effet de serre est soumise à plusieurs influences. Elle dépend des apports d'origine volcanique, de l'altération chimique des roches sur les continents par le CO₂ et l'eau, et, enfin, du piégeage du carbone sous forme de matières organiques sédimentaires ou de sédiments calcaires. Les sédiments sont réincorporés dans le cycle du carbone par dissolution dans les fonds océaniques, ou par décomposition lorsqu'ils plongent dans le manteau terrestre au niveau des zones de subduction*.

Que se passe-t-il lorsque l'activité volcanique augmente ? La concentration de l'air en gaz carbonique s'élève, les températures et précipitations s'accroissent, ce qui, globalement, accentue l'altération chimique



* Dans les **zones de subduction**, la croûte océanique disparaît sous les continents et plonge dans le manteau terrestre.

SUR LE WEB

www.larecherche.fr/special/web/webhs17p1.html

De nombreux liens sur le risque climatique sélectionnés par *Les Dossiers de La Recherche*.

www.ipcc.ch

Le site officiel du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat.

www.effet-de-serre.gouv.fr/

La mission interministérielle de l'effet de serre.

tinyurl.com/2xvv28

tinyurl.com/2fbpe7

tinyurl.com/yqfk57

Trois présentations accessibles du climat et de l'effet de serre.

* Les **isotopes** sont des atomes ayant le même nombre d'électrons et de protons mais qui diffèrent par leur nombre de neutrons.

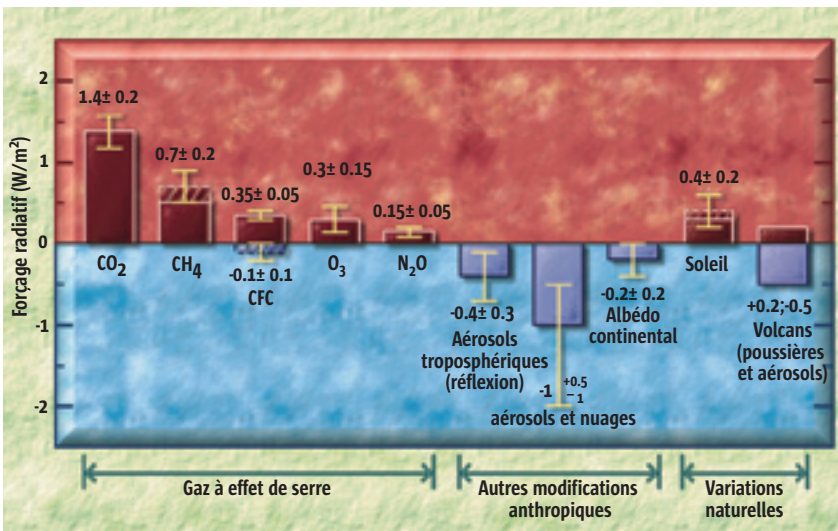
des roches silicatées, et donc la consommation de CO_2 . C'est un mécanisme de « rétroaction négative », qui a permis de contenir les variations de l'effet de serre à long terme. Si l'on se place maintenant sur une échelle plus petite (les dernières centaines de milliers d'années), l'évolution de la teneur en gaz carbonique résulte de mécanismes différents, principalement liés aux cycles glaciaires. L'étude des glaces de l'Antarctique nous a appris que la teneur atmosphérique du CO_2 et du méthane varie respectivement entre 300 ppmv et 200 ppmv, et entre 0,8 ppmv et 0,4 ppmv, de façon pratiquement synchrone. Pour ces deux gaz, les teneurs les plus hautes sont observées pendant les périodes chaudes, et les valeurs basses pendant les épisodes glaciaires extrêmes.

Quelle a été l'influence de l'homme sur les émissions de CO_2 ?

La teneur atmosphérique en CO_2 a augmenté de 36 % depuis la fin du XIX^e siècle. Cette hausse a été essentiellement provoquée par les activités humaines, comme en témoignent les variations opposées de CO_2 et d'oxygène dans l'atmosphère, ainsi que les mesures isotopiques* de carbone (^{14}C et ^{13}C). Pourtant, les émissions anthropiques ne représentent qu'un vingtième des apports naturels de carbone à l'atmosphère. Les émissions supplémentaires induisent un déséquilibre du cycle de carbone : bien qu'une molécule de CO_2 ne persiste dans l'atmosphère qu'une dizaine d'années,

l'effet d'une anomalie de CO_2 atmosphérique se fera sentir pendant plus d'un siècle car les molécules restent confinées à la surface de l'océan et rediffusent rapidement vers l'atmosphère. On estime que les trois quarts environ du dioxyde de carbone dû aux activités humaines ces deux dernières décennies sont à mettre sur le compte de la combustion de carburants fossiles (pétrole, charbon, gaz naturel). On obtient cette proportion à partir des consommations pour chaque pays, un chiffre que l'on connaît à environ 10 % près. Le quart restant proviendrait principalement de la déforestation et de l'évolution

Fig.2 Le bilan des changements de 1850 à 2000



POUR RÉSUMER LES CHANGEMENTS DU BILAN RADIATIF TERRESTRE (les « forçages radiatifs ») depuis un siècle et demi, on convertit les perturbations en watts par mètre carré (W/m^2), ce qui permet d'effectuer des comparaisons avec les variations naturelles. Les barres verticales indiquent la valeur la plus probable pour les estimations, mais la variabilité des données relevées dans la littérature scientifique est très élevée, comme l'indiquent les barres d'incertitude. Les parties hachurées

correspondent aux effets indirects : oxydation du méthane dans la stratosphère (et augmentation de la teneur en vapeur d'eau) ; destruction de la couche d'ozone par l'intermédiaire des CFC ; et augmentation des teneurs en ozone induites par un accroissement du rayonnement ultraviolet du Soleil et par la destruction du méthane. L'incertitude pour les volcans n'a pas été indiquée car les données sont trop fragmentaires.

© DR/D'APRÈS J. HANSEN ET AL., PNAS, 97, 9875, 2000.

des pratiques agricoles. Dans le premier cas, soit le bois est brûlé, soit il finira par pourrir. Dans le second, c'est la teneur en carbone d'une surface qui varie, par exemple lorsqu'une prairie est convertie en champ. Le calcul de cette part, qui concerne avant tout aujourd'hui les pays qui connaissent une forte croissance démographique, est beaucoup plus difficile à faire, car il requiert de connaître les surfaces défrichées, l'usage qui en est fait, ou les masses de carbone contenues dans les arbres brûlés et dans les cultures.

La croissance des émissions de CO₂ issues du charbon, du pétrole et du gaz naturel a été supérieure à 3 % par an entre 2000 et 2005, contre moins de 1 % entre 1990 et 1999. Si l'on y ajoute la déforestation, on atteint 9 milliards de tonnes de carbone par an, contre moins de 8 dans les années 1990. En conséquence, la teneur en gaz carbonique de l'atmosphère atteint aujourd'hui 383 ppmv, contre 280 avant la révolution industrielle, un niveau sans précédent depuis un million d'années. Au total, le dioxyde de carbone aurait été responsable d'un forçage radiatif de 1,4 watt par mètre carré depuis 1850 [fig. 2].

Et sur la production de méthane ?

Depuis le début de l'ère industrielle, la proportion de méthane dans l'atmosphère a augmenté de plus de 150 %, et cette croissance se poursuit au même rythme environ que la démographie.

Le méthane est produit naturellement lors de la décomposition de matière organique dans les milieux humides en l'absence d'oxygène. On estime que ce sont ainsi entre 150 et 240 millions de tonnes de gaz qui sont émises chaque année. À cela viennent s'ajouter des émissions d'origine anthropique, qui sont aujourd'hui devenues plus importantes que les émissions naturelles :

- l'utilisation de combustibles fossiles s'accompagne d'une émission de quelque

100 millions de tonnes par an et la combustion de biomasse (essentiellement pour la culture sur brûlis) de 40 millions de tonnes ;

- les émissions dues à la fermentation dans la panse des bovins peuvent être calculées dans les pays où le cheptel est bien connu. Quelque 100 millions de tonnes de méthane seraient émises chaque année du fait de l'élevage ;

- pour les rizières, on avance des valeurs allant de 50 à 100 millions de tonnes. Et pour les fuites industrielles (pipelines, mines de charbon) et les décharges d'ordures ménagères, la fourchette est de 40 à 70 millions de tonnes.

Au total, ce sont donc entre 330 et 410 millions de tonnes de méthane d'origine anthropique qui sont émises chaque année.

À lui seul, le méthane a été à l'origine d'un forçage radiatif de 0,5 watt par mètre carré. Mais des effets indirects s'ajoutent : le méthane est oxydé, ce qui entraîne une augmentation de la teneur en vapeur d'eau dans la haute atmosphère, et donc un accroissement de l'effet de serre. Dans la basse atmosphère, les réactions qui conduisent à la destruction du méthane (qui mettent en jeu la pollution par les oxydes d'azote) conduisent à une augmentation de la teneur en ozone. Si l'on inclut ces effets indirects, le méthane serait responsable d'un forçage radiatif de 0,7 watt par mètre carré, c'est-à-dire la moitié de celui attribué au gaz carbonique.

Une autre contribution pourrait être celle du méthane « congelé » sous la forme d'hydrates de gaz. Dans ces « clathrates », qui se forment à haute pression et basse température, les molécules d'eau s'organisent en une sorte de cage où se loge le méthane produit principalement par des bactéries.



LA RECHERCHE A PUBLIÉ

Sophie Godin-Beekmann, « Vers un rétablissement de la couche d'ozone ? », février 2005, p. 50.

Gavin Schmidt, « La fulgurante ascension du méthane », septembre 2004, p. 48.

Édouard Bard, « Le climat peut-il basculer ? », mars 2004, p. 30.

Nicolas Chevassus-au-Louis, « Enquête sur les experts du climat », décembre 2003, p. 59.

Laurent Bopp, Louis Legendre et Patrick Monfray, « La pompe à carbone va-t-elle se gripper ? », juillet-août 2002, p. 48.

Édouard Bard, « Les humeurs du Soleil changent notre climat », avril 2002, p. 16.

Joël Savarino et Mark H. Thiemens, « L'ozone, une molécule hors la loi », décembre 2001, p. 40.

Serge Planton et Pierre Bessemoulin, « Le climat s'emballé-t-il ? », octobre 2000, p. 46.

* Les **chlorofluorocarbures (CFC)** sont des composés organiques obtenus en remplaçant les atomes d'hydrogène d'un hydrocarbure par des atomes de chlore ou de fluor.

Cet édifice cristallin se déstabilise facilement si la température s'élève ou si la pression diminue, libérant le méthane gazeux. Pour toutes ces raisons, certains chercheurs estiment que les stratégies de lutte contre l'émission des gaz à effets de serre devraient être davantage axées sur le méthane.

Quelles sont les autres conséquences des activités humaines ?

Depuis le début de l'ère industrielle, la concentration atmosphérique de protoxyde d'azote a augmenté de 19%. Plusieurs facteurs anthropiques distincts permettent de l'expliquer. L'activité microbienne des sols cultivés (notamment à cause des surfaces cultivées et de l'usage d'engrais azotés) compterait pour plus de 50% de l'augmentation. Viennent ensuite l'élevage, pour un quart environ des apports anthropiques, et les sources industrielles (en particulier l'industrie chimique), pour environ un autre quart. Les estimations du total des émissions d'azote qui en résultent sont très variables selon les auteurs, avec des fourchettes de 7 millions de tonnes à 37 millions de tonnes par an.

La concentration en ozone troposphérique a également augmenté depuis le début de l'ère industrielle : + 36%. Dans la basse atmosphère, l'ozone se forme par réaction photochimique entre différents composés naturels ou anthropiques (composés organiques volatils et oxydes d'azote). Cette molécule fait écran à la fois aux rayonnements ultraviolets en provenance du Soleil et aux infrarouges émis par la Terre.

Les CFC*, d'origine uniquement anthropique, absorbent plus de dix mille fois plus les rayonnements infrarouges que la molécule de gaz carbonique. Ils sont responsables d'un forçage radiatif d'environ 0,35 watt par mètre carré. Mais les CFC ont aussi un effet destructeur sur la couche d'ozone stratosphérique (produit naturellement dans la haute atmosphère). Il en résulte une diminution de l'effet de serre de 0,1 watt par mètre carré.

L'action de l'homme est donc aussi à l'origine de diminutions du forçage radiatif. Les combustions d'hydrocarbures fossiles s'accompagnent ainsi d'une production d'aérosols, c'est-à-dire de suspensions de fines particules dans l'air. Les plus importants pour le bilan radiatif sont les sulfates et les particules carbonées, comme la suie et les composés organiques. Ces aérosols jouent directement sur le bilan radiatif en réfléchissant les rayons du Soleil (donc en diminuant la part du flux solaire qui atteint la Terre), et indirectement en modifiant l'abondance et les propriétés réfléchives des nuages. Certains types d'aérosols peuvent aussi absorber significativement les rayonnements solaires, ce qui contribue au réchauffement de l'atmosphère.

Un autre facteur limite le réchauffement : l'augmentation de la réflectivité des continents. Par exemple, la transformation d'une forêt en champ de blé augmente l'albédo. Les estimations globales sont encore assez peu précises, mais il semble que l'albédo continental ait crû depuis 1850.

Quelles sont les principales incertitudes ?

Pour certains, les aérosols (notamment ceux soufrés) ont compensé le réchauffement dû à l'accroissement de gaz carbonique. Le réchauffement du XX^e siècle serait alors largement dû aux autres gaz à effet de serre : si le seul phénomène en jeu était la combustion d'énergies fossiles avec libération de CO₂ et d'aérosols, aucun réchauffement n'aurait été constaté. L'idée d'injecter de grosses quantités d'aérosols dans la haute atmosphère pour faire écran au flux solaire et contrebalancer l'effet de serre n'en apparaît pas moins aberrante au vu des incertitudes et de la faible durée de vie des aérosols dans l'atmosphère (quelques semaines).

Une autre grande incertitude concerne le cycle de l'eau. En premier lieu, un réchauffement climatique dû à un accroissement de l'effet de serre favorise l'évaporation des surfaces marines et continentales. La vapeur

formée se recondense rapidement, mais le résultat net est une augmentation de la teneur atmosphérique en vapeur d'eau. Il y a ainsi une interaction forte entre le cycle du carbone et celui de l'eau : le réchauffement induit par une augmentation de la teneur en gaz carbonique est approximativement doublé par l'effet sur la vapeur d'eau.

Mais qui dit augmentation de la teneur en vapeur d'eau dit davantage de nuages. Or, ceux-ci agissent à la fois en réfléchissant le rayonnement solaire incident – ce qui tend à refroidir le sol – et en absorbant les infrarouges émis par la surface terrestre – ce qui renforce le réchauffement. Les choses sont extrêmement complexes : l'effet sur le bilan radiatif dépend même de l'altitude et du type de nuages. Par exemple, les nuages de basse altitude agissent essentiellement par leur pouvoir réfléchissant, alors que ceux de haute altitude ont un pouvoir absorbant relativement plus fort. D'après les mesures satellitaires, il semble que, globalement, les nuages tendent à refroidir le climat.

Cet effet a dû se renforcer depuis le début de l'ère industrielle. Notamment en raison des... aérosols, qui jouent le rôle de noyaux de condensation pour les gouttelettes d'eau, augmentant ainsi la réflexion du rayonnement solaire et la durée de vie des nuages.

Deux autres exemples d'effet paradoxal : une augmentation de la température favorise la fonte de la banquise, ce qui tend à diminuer la fraction réfléchie du flux solaire incident ; elle favorise aussi un accroissement de l'humidité et, du coup, une augmentation du manteau neigeux dans les régions

froides. Ces quelques exemples illustrent l'infinie complexité des processus en jeu et leurs multiples interactions.

Le cycle du carbone va-t-il changer ?

Le réchauffement climatique aura à moyen terme des répercussions importantes sur le cycle du carbone. Elles vont tendre à diminuer le pompage du CO₂ atmosphérique dans les principaux puits de carbone et donc à augmenter l'effet de serre terrestre. L'océan constitue un puits qui pompe environ un tiers du gaz carbonique émis par les activités humaines, mais cette capacité à réguler l'effet de serre devrait en fait diminuer dans le futur. En effet, la solubilité du CO₂ chute lorsque les eaux de surface deviennent plus chaudes et acides. Par ailleurs, la circulation océanique profonde devrait probablement ralentir, ce qui diminuerait encore l'efficacité du transport du carbone vers l'énorme réservoir constitué par l'océan profond.

Une autre conséquence serait une perturbation de la capacité de la biosphère à pomper le CO₂ de l'atmosphère. Aujourd'hui, les forêts continentales constituent un puits de carbone qui absorbe un peu moins du quart des émissions humaines de CO₂, mais l'évolution au cours du prochain siècle de ce puits de carbone est incertaine. En majorité, les modèles théoriques indiquent que cette capacité de stockage du carbone devrait diminuer au cours du prochain siècle. Ces modèles traduisent le fait que la photosynthèse du feuillage augmente avec le dioxyde de carbone et la température, mais que la décomposition de la matière organique augmente aussi avec la température.



POUR EN SAVOIR PLUS

Quel temps fera-t-il demain ?, La Recherche/Tallandier, 2007.

Édouard Bard (dir.), *L'Homme face au climat*, Odile Jacob, 2006.

Gérard Lambert (dir.), *Le Méthane et le destin de la Terre*, EDP Sciences, 2006.

Édouard Bard, *Effet de serre et glaciations, une perspective historique*, Comptes Rendus de l'Académie des sciences (CR Geosciences) 336, 603, 2004.