

# L'homme et l'effet de serre

Grâce aux gaz à effet de serre, la température moyenne autour de la terre est de 15°C. Mais depuis le début de l'ère industrielle, leur taux a augmenté dans l'atmosphère, risquant d'entraîner de profonds bouleversements climatiques...

ENERGIE  
43%

TRANSPORTS  
24%

INDUSTRIES  
19%

VILLES  
14%

SOURCES DE MÉTHANE (CH<sub>4</sub>)  
LIÉES À L'ACTIVITÉ  
HUMAINE

BÉTAIL  
30%

RIZIÈRES  
22%

PÉTROLE  
17%

FEUX  
11%

DÉCHETS  
11%

CHARBON  
9%

**N**e dénigrons pas l'effet de serre. Sans lui, la température moyenne à la surface de la Terre serait de -18 °C. La vie serait tout simplement impossible. Heureusement, le dioxyde de carbone, le méthane et quelques autres gaz dits « à effet de serre » (GES) contenus dans l'atmosphère agissent comme la serre d'un jardinier. En empêchant une partie de l'énergie solaire reçue par la Terre de repartir dans l'espace, ils maintiennent une température moyenne de 15 °C autour de notre planète, particulièrement clémente. Depuis des millions d'années, le climat enchaîne des périodes glaciaires (froides) et interglaciaires (chaudes, comme actuellement). Or, depuis le milieu du XIX<sup>e</sup> siècle, la température s'est élevée de 0,4 °C à 0,8 °C. L'homme pourrait-il être responsable de cette nouvelle augmentation ? Les experts du Groupement international sur l'évolution du climat (GIEC) en sont aujourd'hui convaincus. Depuis l'ère industrielle, les activités humaines ont entraîné une hausse significative des GES dans l'atmosphère. Ainsi, en cent cinquante ans, la combustion des énergies fossiles (charbon, gaz naturel, pétrole) et la déforestation ont entraîné une élévation du taux de dioxyde de carbone de 30 %. Durant cette période, en raison de la poussée démographique et de l'intensification de l'agriculture et de l'élevage, la concentration en méthane a augmenté de 145 %. « L'Homme a rajouté en deux cents ans autant de gaz à effet de serre que la nature en plusieurs milliers d'années, constate Sylvie Joussaume, climatologue au Laboratoire des sciences du climat et de l'environnement (LSCE)

à Saclay. Depuis quatre cent mille ans, jamais les taux de dioxyde de carbone n'avaient été aussi élevés ».

Si rien n'est entrepris pour limiter l'envolée des GES, de profonds bouleversements climatiques sont d'ores et déjà prévisibles. Selon le dernier rapport des experts du GIEC de janvier dernier, la température devrait s'élever encore de 1,4 °C à 5,8 °C d'ici la fin du siècle.

Une telle augmentation peut sembler infime au regard des variations météorologiques, mais les modèles informatiques montrent qu'une élévation de température, aussi infime soit-elle, est susceptible de provoquer de graves perturbations. Le réchauffement entraînerait une fonte des glaces et une dilatation des eaux, conduisant à une élévation du niveau des océans de près de 50 cm, menaçant d'inondation certaines régions côtières : Bangladesh, Camargue en France, Égypte, Floride et Texas aux États-Unis, Pays-Bas, Japon. Les climatologues s'attendent également à une intensification des fluctuations climatiques, avec une multiplication d'épisodes de grands froids et de canicules, de périodes de sécheresses et de pluies, et une fréquence accrue des catastrophes naturelles. Les précipitations devraient ainsi s'accroître dans le Nord tandis qu'elles devraient chuter de façon tragique au Sud, dans des régions déjà touchées par la désertification. « Ces perspectives invitent à la prudence, conclut Sylvie Joussaume, d'autant que l'idée que toute variation climatique prend forcément beaucoup de temps est aujourd'hui dépassée : le climat pourrait s'emballer plus rapidement que prévu. »

## LES GAZ INCRIMINÉS DANS LE RÉCHAUFFEMENT DE LA PLANÈTE

### Les chlorofluorocarbones (CFC)

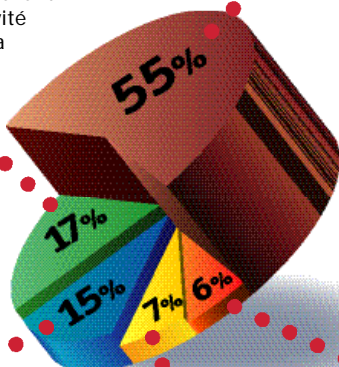
ont été couramment utilisés (sous le nom de fréon), en particulier dans les bombes aérosols, les réfrigérateurs et les mousses expansées, avant d'être interdits en raison de leur nocivité pour la couche d'ozone (Voir " Et la couche d'ozone ?"). Ces gaz, d'une durée de vie de 60 à 120 ans selon leur formule, ont participé à l'effet de serre. Certains CFC sont aujourd'hui remplacés par des hydrofluorocarbones (HF), qui, avec deux autres gaz fluorés (les hydrocarbures perfluorés et l'hexafluorure de soufre), contribuent dans une moindre mesure à l'effet de serre.

### Le méthane (CH<sub>4</sub>)

est dégagé par la décomposition de la matière organique dans des milieux comme les rizières, les décharges et des marécages. Il est également produit, par fermentation, lors de la rumination du bétail, ainsi que par l'exploitation des gisements de gaz naturel et des mines de charbon. Son augmentation, essentiellement d'origine agricole, est liée à la poussée démographique mondiale. Sa concentration a augmenté de 145 % depuis 1750. Si le CH<sub>4</sub> est un gaz à effet de serre très efficace, il a une durée de vie faible, d'environ dix ans.

### Le dioxyde de carbone (CO<sub>2</sub>)

ou gaz carbonique est présent naturellement dans l'atmosphère, la biosphère terrestre et les océans, entre lesquels s'effectuent des échanges. Il est produit lors des éruptions volcaniques, ainsi que par la respiration animale et végétale. Le CO<sub>2</sub> est absorbé par les végétaux (photosynthèse) et par les océans. L'augmentation de ses rejets est surtout due à la combustion de carbone fossile (pétrole, charbon, gaz naturel), pour le transport, l'industrie et la production d'énergie. La déforestation des forêts tropicales participe également à cette élévation : par le dégagement gazeux produit par les incendies, parce que les forêts détruites sont autant de site de stockage du carbone. En 100 ans, sa concentration a augmenté de 30 %. Le CO<sub>2</sub> est responsable de la moitié de l'accroissement de l'effet de serre. Problème : sa durée de vie dans l'atmosphère, avant d'être capté par les plantes ou les océans, est de l'ordre de quelques centaines d'années.



Divers

### L'Oxyde nitreux (N<sub>2</sub>O)

est produit par l'action de micro-organismes dans les sols agricoles et des forêts tropicales, dans les eaux, et par la combustion des végétaux. Son augmentation, de 7,6 % au cours des 100 dernières années, serait notamment liée à l'utilisation d'engrais azotés. La durée de vie du N<sub>2</sub>O est de cent cinquante ans.

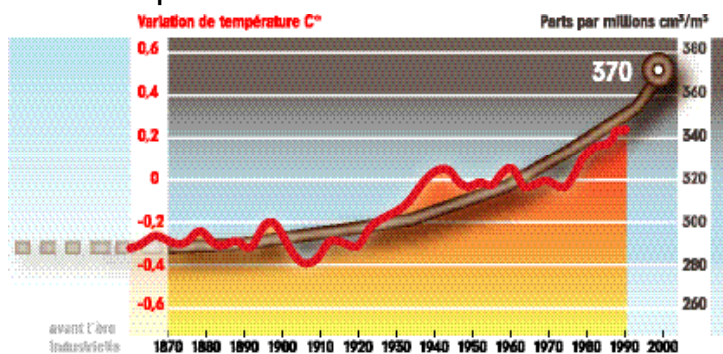
### La vapeur d'eau

est le plus important des gaz à effet de serre de la planète, étant donné la superficie océanique à partir de laquelle elle est émise. L'Homme n'intervient pas directement sur sa teneur. En revanche, une élévation de température entraîne une augmentation de l'évaporation, et donc de la vapeur d'eau qui amplifie le réchauffement. Ainsi, toute modification du climat liée à l'augmentation des autres gaz à effet de serre entraîne un réajustement des teneurs en vapeur d'eau, qui agissent en retour sur les températures. Le problème se complique si l'on considère le rôle des nuages : ils refroidissent la surface de la Terre en réfléchissant une partie du rayonnement solaire, tout en produisant également un effet de serre, qui au contraire la réchauffe...

### Et la couche d'ozone ?

Réchauffement climatique et trou dans la couche d'ozone ne sont pas liés. Seul point commun : ils sont tous deux une conséquence des activités humaines. La couche d'ozone, située à environ 30 km d'altitude dans la stratosphère, filtre la majorité des rayonnements nocifs du soleil (ultraviolets). Le constat de sa sensible diminution sous l'action des chlorofluorocarbones (CFC), notamment au-dessus des pôles, fait réagir la communauté internationale : en 1987, puis en 1990, elle décide d'interdire la production et l'utilisation de CFC à l'horizon 2000. Mais il faudra encore une cinquantaine d'années avant que la couche d'ozone ne revienne à son niveau initial. L'ozone qui s'accumule dans la troposphère (basse atmosphère qui culmine à 16 km), provient de l'interaction entre gaz issus d'activités humaines sous l'effet de l'ensoleillement. S'il contribue à renforcer l'effet de serre dans une moindre mesure, il est néfaste pour la santé. La frontière entre basse et haute altitude étant relativement étanche, l'excès d'ozone dans la troposphère lié à la pollution ne peut venir combler son déficit stratosphérique.

### évolution du taux de CO<sub>2</sub> dans l'atmosphère depuis le début de l'ère industrielle



# Creusez pour connaître le passé

Les traces des climats passés sont piégées dans les profondeurs des glaces polaires ou des fonds océaniques. Encore faut-il pouvoir les recueillir et développer des techniques fiables pour les analyser.

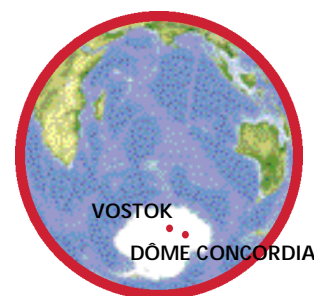
**L**es archives des temps anciens ne se trouvent pas dans l'ambiance calme et feutrée des bibliothèques. Pour comprendre les climats du passé, mieux vaut consulter la calotte glaciaire antarctique. En effet, durant plusieurs centaines de milliers d'années, les glaces polaires ont emprisonné au cours de leur formation de minuscules bulles d'air, précieux témoignage des climats disparus. À la station soviétique Vostok, ou à Dôme Concordia, la nouvelle base polaire européenne, les climatologues se livrent ainsi à une drôle d'occupation : par - 40 °C, et dans des conditions souvent difficiles, les chercheurs creusent sur plusieurs kilomètres de fond (jusqu'à 3 623 mètres !) pour remonter de longs cylindres de glace, des « carottes », contenant les précieuses bulles d'air.

## Les carottes à la loupe

Les carottes, dès leur extraction, font l'objet d'une stratigraphie visuelle : une étude à l'œil nu qui permet de dater sommairement les strates visibles. Lorsque les précipitations sont supérieures à une vingtaine de centimètres de neige par an, des couches annuelles peuvent être identifiées le long d'une carotte. Mais à Vostok, où les précipitations sont plus faibles (10 cm de neige par an soit 2 cm de glace après tassement), ce sont les traces laissées d'événements connus, comme des éruptions volcaniques, qui fournissent des repères fiables pour dater les échantillons. Bien entendu, d'autres critères interviennent dans la datation. La profondeur donne ainsi une indication fiable, si l'on connaît le volume des précipitations, la manière dont la neige se comprime, et de pouvoir modéliser l'écoulement de la glace. Une autre méthode consiste à mesurer les concentrations de divers isotopes (par exemple, le deutérium et l'oxygène-18) dont les proportions varient avec le temps. C'est en fait la combinaison de plusieurs techniques qui permet de déterminer l'âge d'un échantillon de glace. La mesure ne suffira pourtant pas à dater les

gaz... Car contrairement à ce que nous dicte notre intuition, les bulles d'air n'ont pas le même âge que la glace qui les entoure : elles sont plus jeunes. La neige qui tombe année après année emprisonne de l'air. Elle est petit à petit comprimée par le poids des précipitations successives et se transforme lentement en glace. Pendant ce processus qui dure jusqu'à plusieurs milliers d'années, l'air peut encore se déplacer. Puis les pores de la glace finissent par se fermer. La modélisation du phénomène permet ainsi d'établir qu'une glace vieille de 4 000 ans peut emprisonner de l'air quasiment contemporain.

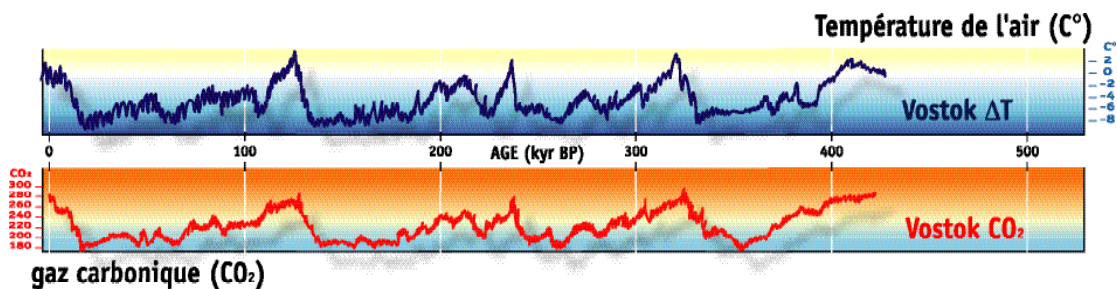
La datation établie, les échantillons sont prêts à fournir quantité de renseignements, à commencer par la température moyenne des climats passés. L'observation des cristaux de glace se révèle être un premier indicateur. En effet, la forme des cristaux varie fortement selon la température qui régnait au moment de leur formation (les cristaux sont d'autant plus petits que la température est basse). Une méthode plus fine consiste à mesurer dans les molécules d'eau le rapport de deux isotopes de l'oxygène ( $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$ ). Une technique qui a notamment permis de retracer les grandes variations climatiques sur plusieurs centaines de milliers d'années. (Voir Thermomètre isotopique) Reste à analyser la composition des bulles d'air piégées dans la glace. Cette mission est prise en charge par le Laboratoire de glaciologie et de géophysique de l'environnement de Grenoble (CNRS). Les analyses, réalisées par chromatographie en phase gazeuse, permettent en particulier de suivre l'évolution des concentrations des gaz à effet de serre en fonction des températures. « En la matière, les résultats obtenus à Vostok sont éloquentes, fait remarquer Jean Jouzel, chercheur au LSCE et pionnier des études de forages glaciaires en Antarctique. Sur les quatre cent vingt mille dernières années, les concentrations en gaz à effet de serre ont pu être corrélées à la température de l'Antarctique. »



## Thermomètre isotopique

*Le dosage des isotopes de l'oxygène dans les glaces polaires ou les sédiments marins est une méthode appropriée en climatologie. En effet, si la quasi-totalité (99,7 %) de l'oxygène naturel est de l'oxygène-16 ( $^{16}\text{O}$ ), une très faible fraction (0,2 %) est constituée d'un isotope plus lourd, l'oxygène-18 ( $^{18}\text{O}$ ). En raison de cette masse plus importante, la vapeur d'eau atmosphérique contenant du  $^{18}\text{O}$  retombe plus rapidement sous forme de pluie. Ainsi, les nuages, qui se déplacent des tropiques vers les pôles, s'appauvrissent en  $^{18}\text{O}$  au fur et mesure de leur avancée dans les régions froides : par conséquent, le taux de  $^{18}\text{O}$  mesuré dans la glace est d'autant plus faible que la température qui régnait lors des précipitations était basse. C'est d'ailleurs cette méthode qui a permis aux scientifiques de reconstruire les fluctuations climatiques sur plus de 420 000 ans.*

# dossier "climats"



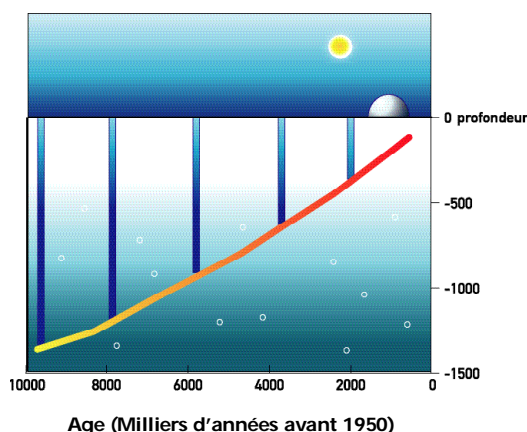
Malgré tout, les renseignements fournis par les glaces antarctiques donnent peu d'indications sur le climat de l'hémisphère Nord.

## Autre hémisphère, autre climat...

En effet, si les concentrations des gaz s'équilibrent rapidement autour de la planète, les températures et les précipitations peuvent être très différentes d'un hémisphère à l'autre. Le climat boréal est d'ailleurs beaucoup plus changeant que celui de l'hémisphère Sud (voir l'encadré ci-contre « Dans les glaces du Groenland »). « Comme les précipitations sont plus abondantes (20 cm à 40 cm de glace par an !), les renseignements recueillis sont bien moins anciens (100 000 ans contre 400 000 ans au pôle Sud), note Valérie Masson-Delmotte, climatologue au LSCE. Ils sont en revanche plus précis et pourront à terme nous livrer quantité de renseignements sur la dernière période glaciaire. »

De même, les forages effectués dans les glaciers tropicaux ne couvrent que les derniers siècles, mais ils ont une résolution de l'ordre du mois et fournissent de nombreuses informations sur les grandes oscillations du système climatique moderne comme El Niño.

Datation estimée en fonction de la profondeur du carottage



## Dans les glaces du Groenland

Si les glaces du Groenland ne permettent pas de remonter aussi loin dans le passé que celles de l'Antarctique, elles constituent cependant un témoignage irremplaçable sur l'histoire climatique de l'hémisphère Nord. Le régime des précipitations, tant plus important, elles fournissent aussi des informations plus détaillées. Les climatologues l'ont bien compris et, depuis 1970, plusieurs campagnes de forages ont pris place au Groenland. De 1989-1993, deux d'entre elles, GRIP (une collaboration européenne) et GISP2 (États-Unis), ont pu procéder des carottages plus de 3000 m de profondeur, soit près de 200 000 ans d'histoire du climat et de la chimie de l'atmosphère. Mais les enregistrements effectués à ces profondeurs sur ces sites de forages, perturbés par la proximité du sol rocheux très vallonné cet endroit, n'ont pu être satisfaisants au-delà de 100 000 ans. C'est pourquoi la nouvelle mission internationale, NorthGRIP, qui a débuté en 1999, s'est installée plus au Nord (d'où son nom) un endroit où le socle est plus plat. Les climatologues comptent ainsi pouvoir remonter jusqu'à la dernière période interglaciaire et déterminer quel rythme s'est effectué le passage vers la dernière période glaciaire, il y a environ 125 000 ans.

## T moins planctoniques

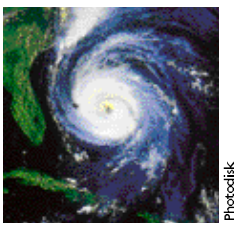
*Les molécules d'eau de mer contenant du  $^{18}\text{O}$  s'évaporent plus facilement que celles constituées de  $^{16}\text{O}$ . L'oxygène se trouve donc essentiellement du  $^{16}\text{O}$ . Lorsque débute une période de glaciation, les précipitations sont immobilisées sous forme de glace à la surface des continents : l'océan s'appauvrit en  $^{18}\text{O}$ , entraînant une inversion du rapport isotopique  $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$ . Certains animaux planctoniques, comme les foraminifères, laborent leur coquille à partir d'ions d'oxygène dissous dans l'eau de mer et gardent en mémoire ce rapport. Mesurés dans les carottes sédimentaires, ils témoignent du volume de glace accumulé sur les continents à l'époque où vivaient ces microorganismes, et donc du climat.*

## La mémoire des océans

Les glaces ne sont cependant pas les seules à conserver la mémoire du climat. Au fond des océans, les sédiments marins qui se sont déposés au cours des âges recèlent également de précieuses informations. Ils permettent même de remonter bien plus loin dans le passé. À bord du navire océanographique *Marion Dufresne*, les scientifiques réalisent des carottages sédimentaires de quelque 60 mètres de long qui leur permettent de remonter jusqu'à un million d'années dans le passé. Les forages de plusieurs centaines de mètres atteignant la croûte océanique permettent, quant à eux, de retracer plusieurs dizaines de millions d'années de climatologie. Les restes de microorganismes présents dans les sédiments fournissent quantité de renseignements sur le climat. La connaissance des époques d'apparition ou de disparition de certaines espèces donne ainsi des indices sur l'âge des échantillons : la présence de coccolithes dans une strate sédimentaire, par exemple, indique que l'échantillon est âgé au minimum de 80 000 ans, époque d'extinction des coccolithophores. Les sédiments livrent également des informations sur la température des eaux (Voir encadré « Témoins planctoniques

»). « La couleur des carottes sédimentaires donne une idée de cette température », explique Elsa Cortijo, chargée de recherche au LSCE. Les sédiments blancs, riches en coquilles calcaires ou siliceuses, sont caractéristiques des climats chauds. Les couches correspondant aux climats froids, quant à elles, sont sombres car elles contiennent une fraction minérale plus importante, constituée en particulier de matériaux détritiques provenant des icebergs. »

Toutes ces informations recueillies du passé s'associent aux mesures actuelles pour améliorer notre compréhension du climat. Elles montrent que ce dernier n'est pas aussi stable qu'on le pensait : des épisodes de réchauffement ou de refroidissement très brutaux ont été enregistrés, d'une dizaine de degrés en moins d'un siècle, surtout lors des périodes glaciaires. Les périodes interglaciaires sont-elles plus stables ? Rien n'est moins sûr. Et si le climat est instable, une modification par l'homme de certains paramètres comme la teneur en gaz à effet de serre peut avoir des conséquences imprévues. Raison de plus pour tenter de limiter ces émissions de gaz et d'approfondir notre connaissance du climat.



Photodisk

## Modéliser pour sonder le futur ...

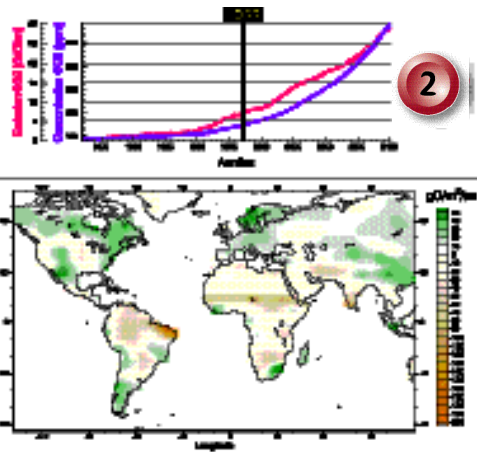
Grâce aux supercalculateurs, les chercheurs simulent des mondes virtuels pour anticiper les climats futurs. Ces modèles constituent des outils incontournables pour quantifier les risques du réchauffement planétaire.



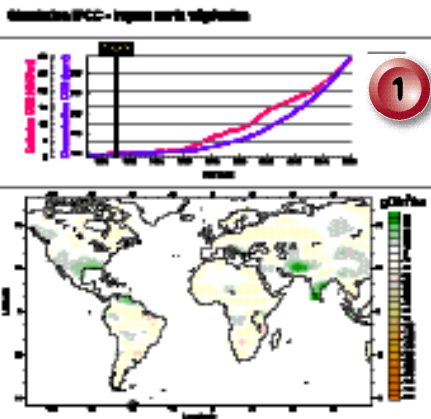
Photodisk

Les climatologues spécialisés en modélisation créent des planètes imaginaires. « *Nous partons de données simples* », souligne Hervé Le Treut, chercheur au Laboratoire de météorologie dynamique à l'université Paris-6, rattaché à l'Institut Pierre-Simon-Laplace (IPSL). « *L'ensoleillement que reçoit chaque région, la forme des continents, le relief au fond des océans, la rotation de la Terre, qui joue un rôle important dans le régime des vents, sont autant de facteurs pris en compte. À partir de ces variables imposées, le modèle doit retrouver tout seul les données météorologiques, tels la température, les précipitations ou encore les courants océaniques.* » Celui-ci calcule également la composition chimique de l'atmosphère d'après les connaissances actuelles du cycle du carbone. Ainsi, une simulation démarre avec une Terre autour de laquelle règne une même température. Les différences d'ensoleillement, les courants marins et atmosphériques qui se

créent, reconstruisent le climat réel. Les modèles sont même capables de reconstituer les climats de Mars ou de Titan ! À terme, le modélisateur doit confronter sa créature virtuelle au monde réel. Si le modèle ne correspond pas à la réalité, il faut savoir pourquoi : un phénomène important a-t-il été négligé ? Un événement a-t-il été sous-estimé ? Lorsque le modèle reproduit assez fidèlement la réalité actuelle, il peut être utilisé pour prédire le climat futur en fonction des contraintes que l'Homme impose à la planète, telle qu'une augmentation de dioxyde de carbone dans l'atmosphère. « *Ces modèles fonctionnent grâce aux équations fondamentales de la mécanique des fluides (gaz ou liquide)*, explique Hervé Le Treut. *Néanmoins, si les phénomènes à la base du climat sont connus, les modèles sont encore imparfaits, et nous sommes limités par la puissance de calcul des ordinateurs.* » Aujourd'hui encore, les calculs en chaque point de la Terre en carrés de 300 kilomètres de côté dans l'atmosphère et 200 kilomètres dans l'océan. Verticalement, l'atmosphère est divisée en 20 niveaux, et l'océan en 40. Le modélisateur constitue ainsi des volumes. Pour chacun d'eux, sont définies des caractéristiques de température, d'humidité, de courants, de salinité (océans), de pression, d'évolution du vent (atmosphère). Les modèles font communiquer



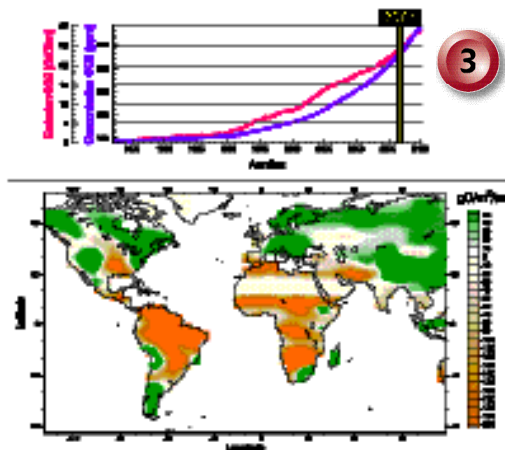
les volumes entre eux, construisant ainsi des climats simplifiés, qui traduisent pourtant la complexité du réel. Grâce à l'amélioration constante des moyens de calcul, les modèles ont cependant beaucoup progressé. Les premiers ne prenaient en compte que l'atmosphère. Ils intègrent maintenant les océans, qui jouent un rôle prépondérant dans les phénomènes climatiques, tel El Niño. Les modèles les plus récents intègrent progressivement les échanges avec la biosphère. En effet, végétation et phytoplancton sont fortement impliqués dans les cycles du carbone ou de l'eau. Bien sûr, ce ne sont pas de petits ordinateurs de bureau qui réalisent de tels calculs : les moyens informatiques sont considérables. « *Sans compter qu'un modèle nécessite une trentaine de personnes qui travaillent ensemble pendant dix ans* », raconte Hervé Le Treut. *Avec la prise en*



P. Friedl / J. G. J. / P. Brockman / LSC / CEA-CNRS

Photodisk

## dossier "climats"



3

Les trois cartes sont extraites d'un modèle simulant de 1888 à 2084 l'impact du changement climatique sur la capacité de la biosphère à stocker le carbone (en milliard de tonnes (Gt) / m<sup>2</sup> / an).

La courbe rose montre le scénario d'émission du CO<sub>2</sub> due aux activités humaines (en Gt de carbone / an) estimé par les experts du Giec. La courbe violette représente l'évolution du CO<sub>2</sub> atmosphérique calculée par le modèle.

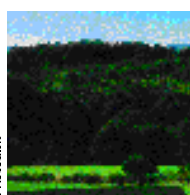
Les régions rouges sont celles où le changement climatique est néfaste à la productivité de la végétation ; les régions vertes, celles où il favorise la croissance de la végétation.

*compte des phénomènes biologiques, il faudra une équipe de 60 chercheurs ! Aucun d'eux ne crée un modèle de bout en bout, mais chacun y apporte sa contribution.* » La simulation permet de retrouver les grands traits d'évolution du climat actuel. En effet, le modèle acquiert rapidement sa vie propre et indépendante. Comme un frère jumeau : identique, mais menant une vie différente.

Les scientifiques sont beaucoup plus unanimes qu'on ne le pense habituellement. Tous les modèles s'accordent sur trois points : le réchauffement général de la planète est très probable, et se traduira par une augmentation de température plus importante aux hautes latitudes (régions tempérées et pôles) qu'à l'équateur. D'autre part, les climats secs seront encore plus secs, et les climats humides s'intensifieront, avec des précipitations plus violentes. Enfin, le relèvement du niveau des mers est presque certain, non seulement à cause de la fonte des glaces, mais également par un phénomène de dilatation de l'eau plus chaude. Au-delà de ces quasi-certitudes, les différents modèles divergent quant aux prévisions régionales. Ainsi, s'ils établissent que l'Europe du Sud sera sujette à un changement, sa nature et son intensité diffèrent selon les modèles. « *Régionalement, la modélisation montre surtout quelles sont les zones les plus vulnérables aux changements climatiques* », précise Hervé Le Treut.



Photodisk



Photodisk

« *Une grande part de l'incertitude sur les prévisions climatiques correspond en fait à une incertitude économique*, note Sylvie Joussaume, climatologue au laboratoire des sciences du climat et de l'environnement (LSCE). *En effet, selon l'augmentation de la population et les mesures politiques de réduction des émissions du dioxyde de carbone, celle-ci peut atteindre une teneur de 500 ppm (parties par millions, ou cm<sup>3</sup>/m<sup>3</sup> d'air) ou plus de 1 000 ppm en 2100, alors que la valeur actuelle est de 367 ppm, et qu'elle était de 280 ppm avant l'ère industrielle.* » En combinant les diverses modélisations aux différents scénarios d'augmentation de gaz à effet de serre, les experts du GIEC concluent dans leur dernier rapport sur une augmentation de température moyenne du globe de 1,4 °C à 5,8 °C en 2100. Cette fourchette de réchauffement prend en compte les incertitudes des modèles, liées notamment à la mauvaise compréhension du rôle des nuages. Elle intègre, de plus, les incertitudes des scénarios, en particulier celles qui sont relatives à la réduction des émissions d'aérosols.

Ces petites particules, émises entre autres par les volcans et les industries, refroidissent le climat. Leur diminution dans l'atmosphère expliquerait les dernières prévisions du GIEC revues à la hausse par rapport à celles de 1995, où la température augmentait au plus de 3,5 °C. De nombreuses améliorations restent à faire sur les modèles actuels, même sur la compréhension du passé. « *Nous comprenons mal les petites variations, qui ont lieu sur quelques dizaines ou centaines d'années*, remarque Sylvie Joussaume. *Nous devons, par exemple, mieux simuler le "petit âge glaciaire", une époque particulièrement rigoureuse du XVI<sup>e</sup> au XIX<sup>e</sup> siècle. Il nous faut aussi mieux prévoir les événements extrêmes, tempêtes, inondations et sécheresses.* » Si les tendances générales sont bien connues, les variations locales restent à préciser. Enfin, si les climatologues comprennent bien le réchauffement, ils ont plus de mal à prédire les changements de précipitations. Les ordinateurs ne sont pas prêts de tourner au ralenti !



Photodisk

# Zones d'ombre sur le cycle du carbone

Le rôle des forêts et des océans restent à préciser pour mieux comprendre le cycle du carbone, élément clé de la compréhension du climat.

**L**a circulation du carbone, principalement sous forme de gaz, le dioxyde de carbone (CO<sub>2</sub>), est un élément clé de la compréhension du climat. Atmosphère, océans, sols, végétaux, animaux... tous contiennent et s'échangent des quantités de carbone par des processus naturels (respiration, photosynthèse, décomposition...). L'Homme, avec les activités industrielles et la déforestation, injecte un flux supplémentaire de

carbone. S'il ne représente que 1 % du carbone atmosphérique, il suffit à perturber le climat.

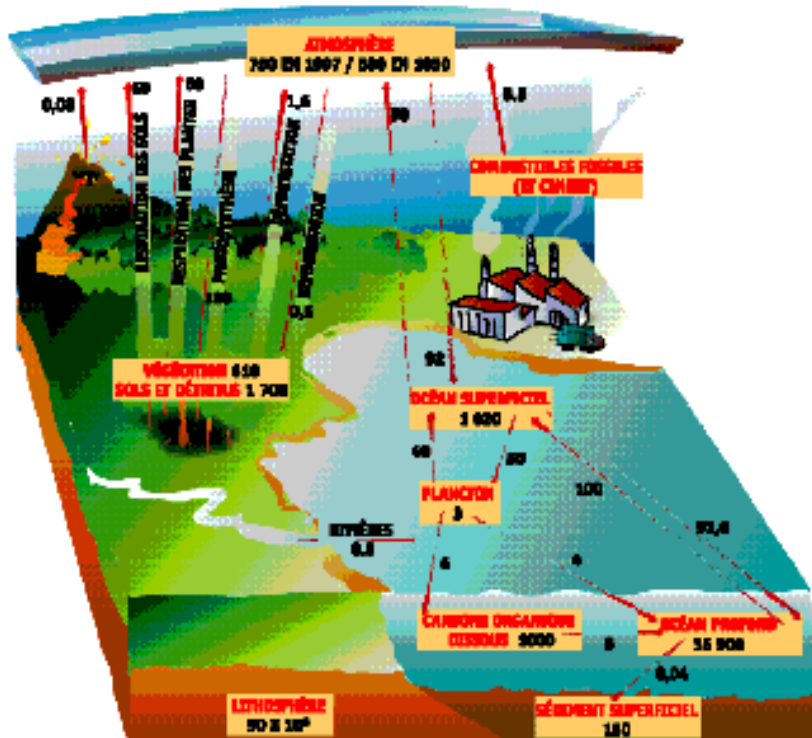
« Seule la moitié de nos émissions de CO<sub>2</sub> se retrouvent aujourd'hui dans l'atmosphère, constate Philippe Ciais, chercheur au LSCE. Ce qui démontre l'existence de "puits de carbone", océans et forêts, qui absorbent et stockent le carbone. Mais la localisation et les mécanismes de ces puits restent mal connus. » Seront-ils un jour saturés,

réduisant leur absorption de carbone ? Relâcheront-ils du CO<sub>2</sub> si leur température augmente, donnant ainsi un coup d'accélérateur au réchauffement ?

Selon les estimations actuelles, l'océan intervient pour moitié dans l'élimination partielle du flux de carbone rejeté par l'Homme. L'absorption s'effectue par dissolution du CO<sub>2</sub> dans les eaux polaires froides et par production de phytoplancton par photosynthèse. L'excès de carbone peut être ainsi stocké au fond des océans pendant plusieurs centaines d'années, à mesure que les courants océaniques ramèneront les eaux profondes en surface. En cas de réchauffement, les eaux polaires absorberaient moins de CO<sub>2</sub>, dont la teneur augmenterait d'autant dans l'atmosphère ; en revanche, la population de phytoplancton augmenterait.

Le rôle des forêts est, quant à lui, plus incertain : à la fois source de carbone (déforestation, décomposition de la matière organique, comme les feuilles et le bois morts...), et puits de carbone, monopolisé par la photosynthèse. Néanmoins, un accroissement de CO<sub>2</sub> stimulerait la production végétale.

« Une meilleure compréhension de tous ces processus permettra de modéliser correctement le climat futur », précise Philippe Ciais. L'amélioration du réseau de mesure de CO<sub>2</sub>, en particulier au-dessus des continents, devrait permettre d'affiner les connaissances sur le cycle du carbone.



**Le cycle du carbone.** Les flux annuels (flèches) et les quantités dans les réservoirs (rectangles) sont exprimés en milliards de tonnes de carbone. La moitié du carbone produit par l'homme reste dans l'atmosphère. L'autre est éliminée par les océans et la biosphère continentale selon des mécanismes encore mal compris.





# Prendre l'air pour comprendre le présent

Le suivi des variations de gaz à effet de serre, en particulier du CO<sub>2</sub>, repose sur un réseau international de prélèvements atmosphériques. Des mesures aéroportées au-dessus des continents viennent aujourd'hui le renforcer.



Cadam / CEA

L'aéroport de Brétigny dans l'Essonne est une base aérienne toute simple : des bâtiments préfabriqués, une piste d'atterrissage et des hangars abritant quelques avions. L'un d'eux, un Piper Aztec, appartenant à Météo France, effectue régulièrement des missions pour le LSCE. Tous les quinze jours, lorsque le temps le permet, cet avion de six places, dont trois sont occupées par des instruments de mesure, réalise des prélèvements au-dessus de la forêt d'Orléans, entre 100 mètres et 3 000 mètres d'altitude. Un petit dispositif situé à l'avant de l'avion pompe l'air ambiant, qui, après filtration et séchage, est envoyé dans un flacon. L'altitude, l'humidité, l'heure de prélèvement, la position de l'avion, sa vitesse, ainsi que celle du vent, sont minutieusement consignées. Objectif : déterminer les variations saisonnières de différents gaz, notamment le gaz carbonique, afin de mieux comprendre le cycle du carbone.

de suivi du dioxyde de carbone », souligne le chercheur. Il s'agit du réseau RAMCES (Réseau atmosphérique de mesure des composés à effet de serre). Quelque 2 000 échantillons d'air sont ainsi analysés chaque année : concentrations en dioxyde de carbone (CO<sub>2</sub>), en méthane (CH<sub>4</sub>), en oxyde nitreux (N<sub>2</sub>O), en hexafluorocarbène (CF<sub>6</sub>), en monoxyde de carbone (CO), mais aussi des mesures des rapports isotopiques du carbone et de l'oxygène dans le CO<sub>2</sub>. « Nous disposons aussi de trois sites de mesures en continu : l'Île Amsterdam, dans l'océan Indien, Mace Head, en Irlande, et l'observatoire du Puy de Dôme, précise Michel Ramonet. Ces mesures sont beaucoup plus exigeantes que celles effectuées ponctuellement, mais elles nous renseignent sur les variations à court terme des teneurs en gaz. Elles nous donnent ainsi accès aux flux régionaux des gaz à effet de serre avant que les circulations de masses d'air ne diffusent ces signaux. »

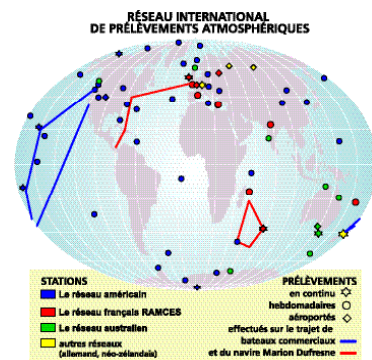
d'émission de gaz à effet de serre par les grands pays industrialisés, l'estimation des sources et des puits de carbone reçoit un éclairage politique et médiatique très important. L'enjeu est également de pouvoir vérifier, à l'horizon 2010, que les différents pays signataires du protocole respectent bien leurs engagements de diminuer leur émission de CO<sub>2</sub>.

« Pour réduire les incertitudes sur le cycle du carbone, note Philippe Ciais, spécialiste en la matière, il faut faire passer nos réseaux de suivi atmosphérique vers un stade plus opérationnel, en augmentant notamment le nombre de stations au-dessus des continents pour comprendre le rôle de la végétation et des sols. » Ainsi, deux nouveaux sites de prélèvement aéroportés pour RAMCES sont en projet pour 2001 : l'un en Hongrie et l'autre en Écosse. À plus long terme, il est prévu d'équiper des avions de ligne qui permettront de quadriller le ciel européen à la recherche des sources et puits régionaux.



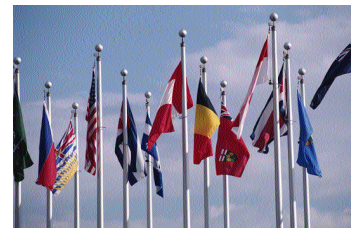
Les flacons d'un litre ainsi récoltés sont familiers à Michel Ramonet, chargé de recherche CNRS au LSCE. Il en détient plusieurs centaines dans les sous-sols de son laboratoire. Des prélèvements d'air sont en effet effectués chaque semaine, selon un protocole rigoureux, dans douze sites répartis dans le monde, et, de manière itinérante, par le navire scientifique *Marion Dufresne* de l'Institut français de recherche et technologie polaires, ainsi que par des bateaux commerciaux. « Le LSCE possède ainsi le troisième réseau mondial

RAMCES coexiste avec deux autres réseaux, l'un américain, l'autre australien. Au total, une centaine de sites de prélèvements et de mesures continues participent à l'amélioration de nos connaissances sur le cycle du carbone. Ils doivent être proches des sources carbonées, tout en étant suffisamment distants pour ne pas être perturbés localement, d'où l'avantage des prélèvements aéroportés. Les mesures de gaz à effet de serre alimentent des modèles de transport atmosphérique qui permettent d'estimer le bilan des échanges de CO<sub>2</sub> de grandes régions. Depuis quelques années, à la suite du protocole de Kyoto (1997) qui prévoit des réductions



Source : LSCE

# Climats et décisions



Lors de la dernière conférence sur le réchauffement climatique à La Haye, la communauté internationale n'a pas trouvé d'accord sur la stratégie à adopter dans la lutte contre l'émission de gaz à effet de serre. Les climatologues sont pourtant catégoriques : si rien n'est fait, l'augmentation de la température de 1,4 °C à 5,8 °C prévue d'ici 2100 pourrait avoir de graves conséquences pour la planète.

**R**io 1992, Kyoto 1997, La Haye 2000, Bonn 2001. De fait, ce sont de véritables matches que se livrent les États aux conférences sur le réchauffement climatique. La dernière s'est tenue à La Haye en novembre 2000, où les 181 pays présents n'ont pas trouvé d'accord sur les modalités d'application du protocole de Kyoto, qui avait fixé les quantités de rejets de gaz à effet de serre autorisées pour chaque pays industrialisé. Les « négociations climatiques » reprendront en juillet 2001 à Bonn.

Mais revenons en 1992, lorsque les États alors réunis à Rio décident de ramener leurs émissions de gaz à effet de serre (GES) aux niveaux de 1990. Ce premier traité, ne représentant que de simples recommandations, restera sans effet... D'où la décision des membres de l'ONU de fixer « des objectifs quantifiés et légalement contraignants ». C'est ainsi qu'en 1997, les 159 pays présents à Kyoto signent un protocole obligeant 38 pays industrialisés à réduire leur émission de CO<sub>2</sub> d'en moyenne 5,2 % par rapport à leurs niveaux de 1990, d'ici 2008-2012. Les pays du Sud ne sont pas impliqués dans cet engagement, pour ne pas compromettre leur chance de développement. L'objectif de réduction est proportionnel au taux d'émission initial de chaque pays : 0 % pour la France (en raison de son parc électronucléaire), 21 % pour l'Allemagne, 12 % pour le Royaume-Uni (au total 8 % pour l'Union européenne), 6 % pour le Japon et le Canada, 7 % pour les États-Unis... Ces derniers, qui produisent à eux seuls un quart des GES mondiaux, ont néanmoins exigé la mise en place d'un « permis d'émission », un dispositif permettant aux pays qui ne remplissent pas leurs objectifs d'acheter aux moins pollueurs le droit d'émettre davantage de GES.

En novembre 2000 à La Haye, devaient être arrêtées les modalités d'application du protocole de Kyoto : contrôle des émissions de GES, sanctions en cas de non-respect des engagements, principe des permis d'émissions... L'échec de cette conférence est inquiétante.

Car les scientifiques sont pratiquement unanimes : il faut lutter contre l'augmentation de l'effet de serre. Les différents entre pays ont porté sur les moyens à mettre en œuvre : faut-il lutter prioritairement contre les émissions

de CO<sub>2</sub>, ou également contre celles d'autres gaz à effet de serre, comme le méthane ? Les puits de carbone doivent-ils être pris en compte de façon prépondérante ? Certains pays peuvent-ils investir dans les pays en développement pour limiter les émissions de gaz, au détriment d'actions chez eux ?

Faut-il favoriser les économies d'énergie ou mettre en place des technologies propres ? Chaque question a fait l'objet d'après discussions, pas toujours basées sur des considérations scientifiques.

Deux conceptions s'affrontent pour lutter contre l'effet de serre. L'Europe plaide pour une diminution notable des rejets de CO<sub>2</sub>, avec des mesures contraignantes, en particulier des sanctions financières, pour les pays dépassant leurs quotas. Les États-Unis, rejoints par le Canada et l'Australie, souhaitent la mise en place de régulations plus souples : prise en compte des puits de carbone, par exemple les forêts qui captent le CO<sub>2</sub>, instauration des permis d'émission. Ces pays souhaitent aussi que le financement de reforestations de pays en développement donne droit à des crédits d'émission de carbone. Les Européens ont rejeté la prise en compte de ces « puits », actuellement difficiles à quantifier, constituant une solution transitoire : les forêts finissent par rejeter le carbone qu'elles ont capté, rejets qui ne sont pas pris en compte.

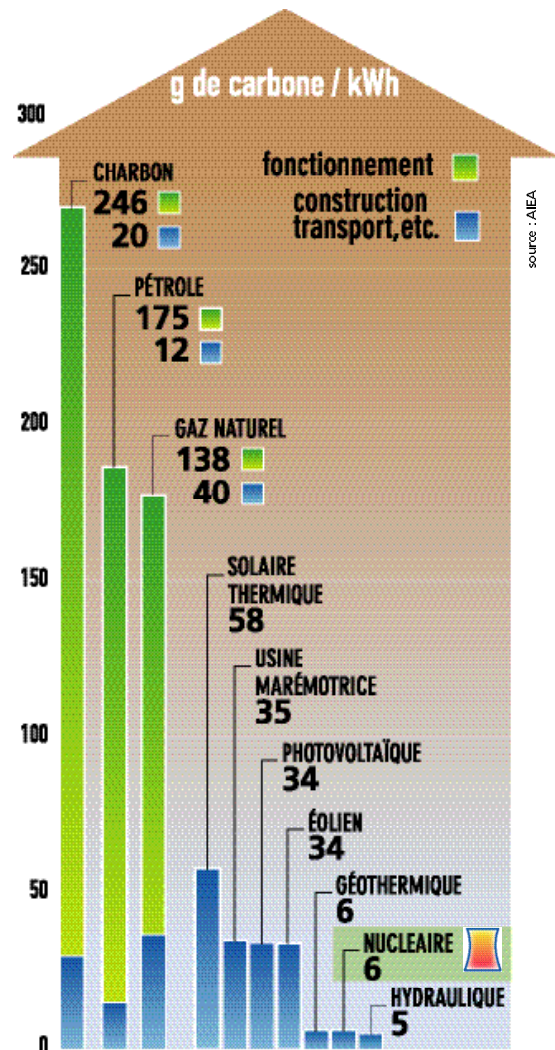
« Les puits de carbone permettent de gagner du temps, de capturer le CO<sub>2</sub> pendant dix, cinquante voire cent ans. Mais ils ne doivent pas servir à éviter la diminution des rejets de CO<sub>2</sub>. précise Philippe Ciais, spécialiste du cycle du carbone au Laboratoire des sciences du climat et de l'environnement (LSCE). *Le problème de l'effet de serre me fait penser à une fuite dans un bateau. Favoriser les puits de carbone revient à pomper l'eau : c'est utile, mais il faut en même temps colmater la brèche, c'est-à-dire dans notre cas réduire nos émissions* ». De plus, si les puits de carbone sont trop importants pour être totalement ignorés comme le souhaitent certains Européens, ils sont, par ailleurs, trop transitoires et incertains pour être facilement pris en compte.

# Energie nucléaire et effet de serre

Coût global d'un kWh électrique  
en terme d'émission de carbone  
(en gramme de carbone par kWh)

La France produit trois fois moins de CO<sub>2</sub> par habitant que les États-Unis. Pourtant, le niveau de vie des Français n'est pas trois fois moins élevé que celui des Américains. Plusieurs raisons expliquent cette différence. La France est habituée à réduire sa consommation d'énergie. Deux crises pétrolières, des campagnes publicitaires antigaspillage et de lourdes taxes sur l'énergie sont passées par là. Mais la raison principale de ses faibles émissions de CO<sub>2</sub> est le poids de sa filière électronucléaire. En effet, 76 % de l'électricité produite en France provient du nucléaire, 13 % sont d'origine hydraulique : seulement 7 % sont obtenus par la combustion de carbone fossile et produisent du CO<sub>2</sub>. Le nucléaire ainsi que les énergies hydrauliques et géothermiques sont celles qui émettent le moins de CO<sub>2</sub>. Pour diminuer encore nos rejets, il faut aussi s'attaquer aux deux sources restantes : l'industrie, et surtout les transports.

Le coût global d'un kWh en terme d'émission de CO<sub>2</sub> intègre les rejets liés d'une part à la construction du moyen de production d'énergie, et d'autre part à son exploitation. Pour les centrales géothermiques, hydrauliques et nucléaires, ce coût correspond uniquement à leur phase de construction, leur exploitation n'entraînant aucune émission de CO<sub>2</sub>.



## Des pistes futuristes ?

**P**lutôt que de réduire les émissions de dioxyde de carbone (CO<sub>2</sub>) pour limiter le réchauffement de la planète, pourquoi ne pas piéger ce gaz ou refroidir la Terre ? Partant de cette idée, certains proposent des stratagèmes pour le moins surprenants. Si certains pourraient être mis en œuvre, d'autres, aussi audacieux soient-ils, relèvent de la science-fiction.

Les solutions envisageables concernent le piégeage du CO<sub>2</sub>. Ainsi, les Norvégiens tentent de limiter la production de CO<sub>2</sub> lors des forages pétroliers. Un gisement ne contient pas uniquement du combustible (pétrole ou gaz), mais aussi de grandes quantités de CO<sub>2</sub>, rejetées dans l'atmosphère au cours de l'extraction.

L'idée serait de réinjecter ce gaz dans les couches géologiques d'où il provient. Ce qui est non seulement réalisable, mais améliorerait aussi le pompage du pétrole. D'autres proposent d'envoyer du CO<sub>2</sub> au fond des mers à l'aide de gigantesques pipelines. Aux énormes pressions existant à ces profondeurs, le CO<sub>2</sub> est liquide et reste

piégé. Si ces deux techniques permettent de piéger le CO<sub>2</sub> produit massivement lors des extractions pétrolières ou par les grosses industries, elles ne sont pas applicables à toutes les sources de rejet de CO<sub>2</sub>, tels notamment les transports.

Autre solution envisagée : augmenter la production de phytoplancton, gros consommateur de carbone, en lui fournissant les nutriments, tel le fer, qui limitent sa croissance. Ces expériences sont hasardeuses, les conséquences à long terme de l'ajout massif de tels nutriments dans la mer n'étant pas connues.

Mais des essais menés à petite échelle permettent de mieux comprendre le comportement du phytoplancton et améliorent ainsi la connaissance du cycle du carbone. Enfin, des idées assez inquiétantes naissent dans la tête de certains chercheurs : par exemple, disposer un miroir géant (2 000 km de large) dans l'espace, afin de renvoyer partiellement les rayons du Soleil si la température augmente trop... Un projet fortement limité par son aspect technique et son coût exorbitant !

