

dioxyde de carbone dans l'atmosphère liée à l'utilisation de combustibles fossiles entraînerait un réchauffement de la planète. Mais c'est en 1958, à l'occasion de l'année géophysique internationale, que les géochimistes Charles Keeling et Roger Revelle, de l'Institution Scripps d'océanographie, ont installé à l'Observatoire de Mauna Loa, situé au sommet de l'île volcanique de l'archipel d'Hawaii, le premier système de mesure en continu de la concentration du dioxyde de carbone atmosphérique. Ces mesures représentent la série la plus longue dont on dispose aujourd'hui.

Des sources et des puits de dioxyde de carbone en évolution

Quels en ont été les principaux résultats ? La concentration atmosphérique du dioxyde de carbone augmente de façon spectaculaire depuis 1958. Voisine de 315 ppm (nombre de molécules par million de molécules d'air hormis la vapeur d'eau) en 1958, elle a dépassé 400 ppm pour la première fois en mai 2013. Les valeurs obtenues à partir de bulles d'air emprisonnées dans la glace de l'Arctique et de l'Antarctique avant l'ère industrielle (à la fin du XVIII^e siècle), sont proches de 280 ppm. La vitesse d'augmentation de la concentration de dioxyde de carbone croît aussi : de 0,7 ppm par an au début des années 1960, elle est passée à 2,0 ppm par an entre 2000 et 2010. Cette accélération est à rapprocher de l'emballement des émissions de dioxyde de carbone d'origine fossile (charbon, pétrole, gaz), dû notamment à la production de ciment : ces émissions ont atteint 35 gigatonnes (milliards de tonnes) en 2011. La déforestation, autre source d'émission de dioxyde de carbone, présente une contribution par les forêts tropicales de quatre gigatonnes de dioxyde de carbone par an.

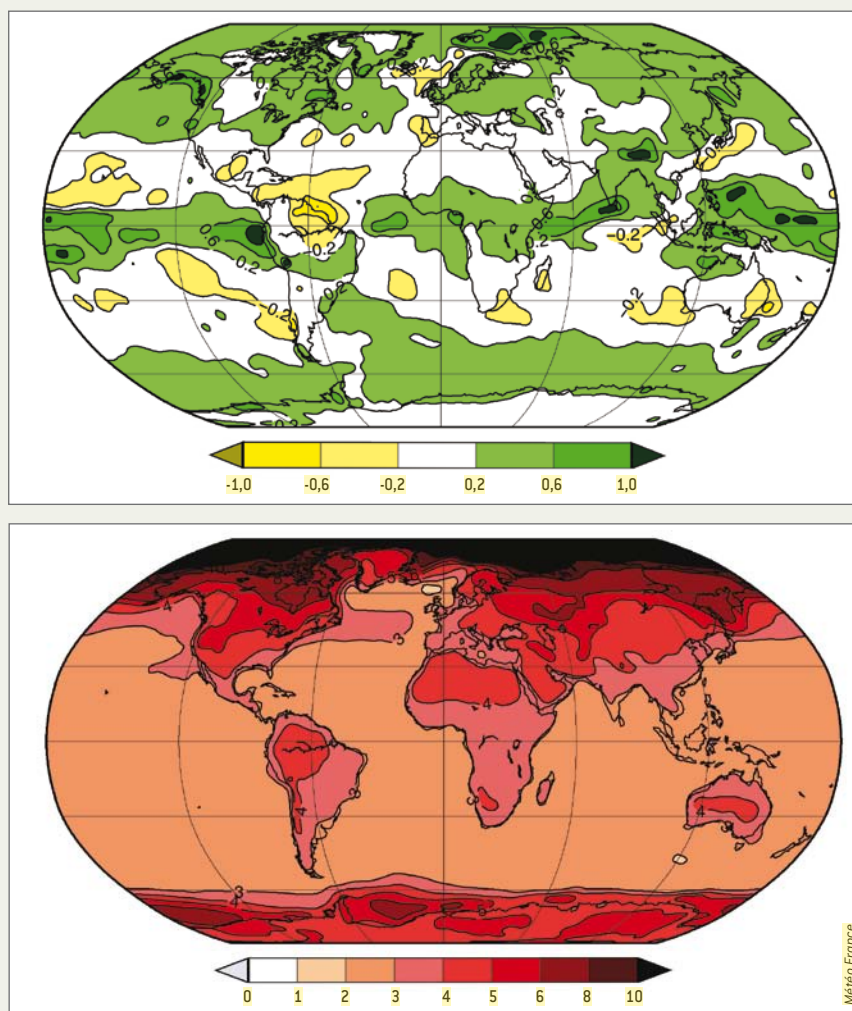
Mais à côté de ces chiffres inquiétants, les recherches révèlent qu'il existe des « amortisseurs » limitant l'ampleur de ces augmentations. Ainsi, on ne retrouve dans l'atmosphère que la moitié environ des quantités de dioxyde de carbone émises. Ce phénomène s'applique aux bilans réalisés au cours de la dernière décennie, mais aussi aux chiffres enregistrés depuis le début de l'ère industrielle. On estime que 2000 (± 312) gigatonnes de dioxyde de carbone ont été émises dans l'atmosphère de 1750 à 2011, du fait des acti-

vités humaines, dont 1340 (± 110) sont attribuées à l'utilisation de combustibles fossiles et à la production de ciment, et 660 (± 295) à la déforestation et au changement d'usage des terres ; 880 gigatonnes « seulement » se sont accumulées dans l'atmosphère.

Les progrès réalisés dans l'évaluation des flux et des bilans de carbone à l'interface océan-atmosphère et à l'interface continents-atmosphère, par des mesures et la modélisation des processus, ont permis d'élucider ce phénomène. Il existe des échanges de dioxyde de carbone intenses entre les océans et les surfaces terrestres, d'une part, et l'atmosphère, d'autre part. Ces échanges qui ont lieu dans les deux sens sont de l'ordre de 290 gigatonnes de dioxyde de carbone par an pour les océans et de 440 pour les surfaces

terrestres. Toutefois, le bilan fait apparaître un léger déséquilibre se traduisant par une accumulation nette de l'ordre de 9 gigatonnes par an dans les océans et à peu près autant dans les systèmes terrestres. Ainsi, ces systèmes atténuent l'augmentation du dioxyde de carbone atmosphérique.

La décomposition des flux par régions a révélé que les forêts tempérées et boréales de l'hémisphère Nord représentent un puits de carbone important. De fait, ces surfaces sont globalement en expansion, accroissant le stock de carbone dans la biomasse. En outre, l'augmentation de la concentration du dioxyde de carbone a un effet « fertilisant », c'est-à-dire qu'elle stimule la photosynthèse et la productivité forestière, donc améliore l'efficacité du « piège ». De surcroît, les dépôts



Résultats des modélisations (modèle CNRM-CM5) indiquant en moyenne annuelle la différence des précipitations (en millimètres par jour, en haut) et des températures (en °C, en bas) entre la période 1970-2000 et la période 2071-2100 dans le scénario RCP8.5 du V^e rapport du GIEC. Il pleuvrait moins sur certaines régions intertropicales, dont l'Amazonie. La température pourrait augmenter de dix degrés dans les régions les plus septentrionales.



Station météo miniature dans le vignoble argentin. Monter en altitude ou changer de latitude peut être un moyen de s'adapter au changement climatique.

atmosphériques d'éléments minéraux issus de la pollution atmosphérique, tels que l'azote et le soufre, pourraient renforcer cet effet fertilisant. La contribution des surfaces agricoles est plus variable : en Europe, les prairies représenteraient un puits de carbone, mais les cultures une source.

Le puits de carbone terrestre continuera-t-il à être aussi efficace dans le futur ? Cela n'est pas certain. Il pourrait l'être de moins en moins, voire cesser de fonctionner en raison de deux mécanismes : d'une part, la biomasse forestière et les sols des écosystèmes terrestres risquent d'être saturés, ce qui réduirait la capacité de séquestration du carbone. D'autre part, le réchauffement climatique futur et l'accentuation des sécheresses risquent de faire basculer ces écosystèmes de l'état de puits à celui de source de dioxyde de carbone, car la photosynthèse serait réduite et la décomposition de la matière organique des sols serait stimulée. La réduction de la productivité et de la séquestration de carbone observée à l'échelle de l'Europe à la suite de la sécheresse et de la canicule de 2003 préfigure une telle évolution.

Le dioxyde de carbone n'est pas le seul gaz à effet de serre qui participe au réchauffement climatique. C'est aussi le cas, entre autres, du protoxyde d'azote (N_2O) et du méthane (CH_4), dont les concentrations atmosphériques

sont mesurées en continu depuis 1976 pour le premier et depuis 1983 pour le second.

D'autres gaz à effet de serre

Ces gaz s'accumulent rapidement dans l'atmosphère et contribuent notablement au réchauffement, malgré leurs faibles concentrations atmosphériques, car leur capacité moléculaire de piégeage du rayonnement infrarouge lointain émis par la Terre est supérieure à celle du dioxyde de carbone. Le méthane est pour la moitié environ (entre 35 et 50 pour cent) d'origine naturelle : il est émis par les zones humides. Le reste est issu de l'agriculture (fermentation entérique des ruminants, effluents d'élevage, rizières), de la fermentation des déchets et d'émissions liées aux énergies fossiles et à la combustion de la biomasse. De surcroît, le réchauffement climatique futur prévu aux latitudes élevées de l'hémisphère Nord aboutirait à la disparition d'une partie des pergélisols, ce qui pourrait entraîner la libération de quantités importantes du méthane actuellement piégé dans ces sols gelés en permanence. Quant au protoxyde d'azote, il est pour les deux tiers d'origine naturelle, lié à la dénitrification des sols et des océans, et pour un tiers d'origine anthropique en lien avec l'utilisation des engrais azotés, de la combustion de biomasse et d'émissions associées aux dépôts atmosphériques d'azote.

Ainsi, la biomasse et les sols permettent aujourd'hui d'atténuer en partie les impacts du changement climatique parce qu'ils séquestrent du carbone. Toutefois, non seulement les puits de carbone terrestres actuels risquent de devenir moins efficaces, mais d'autres sources de gaz à effet de serre pourraient apparaître au moment où les émissions liées à l'agriculture ne cessent de croître. Dès lors, s'il faut continuer à tenter d'atténuer les impacts du changement climatique, il faut aussi chercher comment s'y adapter.

Comment s'adapter au changement climatique ?

D'abord en anticipant mieux l'évolution du climat. Les modèles climatiques ont été notablement améliorés, grâce à une meilleure prise en compte de l'ensemble des gaz à effet de serre et de l'ensemble des phénomènes dits de forçage radiatif, c'est-à-dire de la différence entre l'énergie reçue et celle émise par le système climatique planétaire qui, *in fine*, détermine le réchauffement planétaire. Les puissances de calcul ont été renforcées, les méthodes de modélisation améliorées et on a assisté à une mobilisation sans précédent de la communauté des modélisateurs avec une approche dite ensembliste, permettant de comparer divers modèles. Enfin, la résolution spatiale des modèles a été considérablement améliorée. Par exemple, la maille élémentaire du système de simulation Euro-CORDEX est égale à 12 kilomètres sur 12, de sorte que la représentation des phénomènes locaux et des événements extrêmes – telles les vagues de chaleur et les sécheresses – est bien plus fine.

Quatre nouveaux types de scénarios climatiques, ou plutôt d'hypothèses de scénarios formulées par le GIEC, sont fondés sur différentes valeurs de forçage radiatif, liées à autant d'hypothèses d'atténuation des émissions anthropiques de gaz à effet de serre. Les simulations faites à partir de ces modèles ont montré que le réchauffement depuis 1950 (+ 0,6 °C), ainsi que la fréquence des événements extrêmes ne peuvent être expliqués que par le forçage externe (lié aux activités humaines) du climat. D'après les simulations, le réchauffement à moyen terme (2035) resterait assez