

**Communication
de Monsieur François LE TACON**

☯ ♦ ☯

Séance du 15 février 2002

☯ ♦ ☯

**L'évolution de la concentration
en gaz carbonique
de l'atmosphère au cours du temps
Conséquences possibles**

Introduction

L'évolution de la concentration en gaz carbonique de l'atmosphère au cours du temps et ses conséquences possibles suscitent des débats contradictoires dans la communauté scientifique.

Nous sommes donc dans l'obligation de rester dans le domaine des hypothèses et non des certitudes. La question est cependant devenue suffisamment importante pour être maintenant un problème de société. Elle a été au centre de la conférence de Rio et est un des points clés du protocole de Kyoto.

Nous allons commencer par définir le gaz carbonique et préciser son rôle dans les écosystèmes. Nous allons ensuite traiter de son évolution passée, actuelle et future. Nous allons ensuite analyser les différentes conséquences possibles de l'augmentation de la concentration en gaz carbonique de l'atmosphère sous l'effet de l'activité humaine. Nous traiterons des conséquences possibles sur le climat, le niveau des mers, l'agriculture et enfin les forêts. Nous verrons ensuite comment la communauté internationale essaye de réduire les émissions de gaz carbonique. Nous terminerons par des conclusions et quelques considérations qui n'engagent que l'auteur.

Le gaz carbonique

Le gaz carbonique est constitué d'un atome de carbone associé à deux atomes d'oxygène, d'où le nom de dioxyde de carbone qu'on lui donne parfois. Il se liquéfie à -160 degrés Celsius. Sa concentration est actuellement de 350 parties par million dans l'atmosphère, soit 0,35 pour mille ou 0,035 %. A une concentration de 4 à 5 %, il provoque chez l'homme et les animaux en général une tachypnée. A 10 %, il entraîne une tachycardie, de l'hypotension et une céphalée. A 25-30 %, il provoque une perte de connaissance, puis la mort.

Le rôle du gaz carbonique dans les écosystèmes

Le gaz carbonique joue quatre rôles importants dans les écosystèmes marins et terrestres. Le plus connu est celui qu'il joue dans la photosynthèse et la respiration.

La photosynthèse aérobie et la respiration

Le gaz carbonique est essentiel pour les végétaux chlorophylliens qui le réduisent en composés organiques dans leur feuille grâce à l'énergie solaire et à l'eau puisée dans le sol qui est le donneur d'électrons. Les végétaux synthétisent d'abord des sucres, puis des acides aminés, des lipides et enfin toutes sortes d'autres molécules dont les plus abondantes sont la cellulose et la lignine. Cette réduction du gaz carbonique par les végétaux s'accompagne d'une émission d'oxygène qui est libéré dans l'atmosphère. Les végétaux oxydent ensuite une partie ces composés et en particulier les sucres pour obtenir l'énergie nécessaire dont ils ont besoin pour vivre. Cette oxydation donne du gaz carbonique et de l'eau qui sont rejetés dans l'atmosphère. C'est la respiration. Les végétaux émettent par respiration moins de gaz carbonique qu'ils n'en fixent par photosynthèse. Le bilan est ainsi négatif en CO² pour l'atmosphère. Par contre les végétaux accumulent des composés carbonés réduits. Lorsque les végétaux meurent ou sont récoltés, cette matière organique est utilisée par les êtres vivants hétérotrophes pour le carbone, c'est-à-dire les bactéries non chlorophylliennes, les champignons et les animaux.

Ces hétérotrophes, dont nous sommes, utilisent les composés carbonés fixés par les végétaux pour leur propre constitution et leur énergie. Ils respirent et émettent donc du gaz carbonique et de l'eau dans l'atmosphère. A leur mort d'autres organismes hétérotrophes vont utiliser leur matière organique de constitution et ainsi de suite. A la fin du cycle, tout le gaz carbonique fixé par la photosynthèse des végétaux sera retourné dans l'atmosphère par la respiration des êtres vivants. Le bilan est donc nul, du moins si on ne considère qu'un court laps de temps. Par exemple, contrairement à ce que beaucoup croient, les forêts à l'équili-

bre, comme la forêt amazonienne, ne produisent pas d'oxygène. Elles consomment autant d'oxygène qu'elles en produisent. Cela est heureux car les réserves en gaz carbonique de l'atmosphère sont faibles et, s'il n'y avait pas restitution, la vie s'éteindrait sur terre par arrêt de la photosynthèse.

A l'échelle des temps géologiques, le bilan est différent. Il est en perpétuelle évolution comme nous allons le voir. Une partie de la matière organique n'a en effet pas été oxydée. Elle s'est accumulée dans des conditions d'anaérobiose et s'est transformée en tourbe, lignite, charbon, gaz ou hydrocarbures. D'énormes quantités de gaz carbonique ont ainsi été soustraites de l'atmosphère. En contrepartie, l'oxygène s'y est accumulé.

Le rôle du gaz carbonique dans l'altération des minéraux.

Ce rôle est moins connu, mais tout aussi essentiel. Le gaz carbonique se dissout dans l'eau pour former les acides carboniques et bicarboniques. Ce sont des acides faibles mais néanmoins efficaces dans l'altération des minéraux primaires des roches magmatiques. L'eau de pluie chargée en acides carbonique et bicarbonique a un pH de l'ordre de 5. Les cations, calcium, sodium et potassium sont libérés par cette acidité des feldspaths, plagioclases et autres minéraux. Ils passent dans les solutions du sol, puis sont absorbés par les végétaux ou sont entraînés dans les mers. Les continents s'acidifient en surface, alors que les eaux marines s'alcalinisent.

Le rôle du gaz carbonique dans la formation du carbonate de calcium.

Le potassium et le sodium entraînés dans les mers après altération des minéraux primaires forment des composés très solubles dont le plus connu est le chlorure de sodium. Il ne peut précipiter qu'après évaporation de l'eau. Le chlorure de sodium reste donc pour l'essentiel dans les eaux marines comme le chlorure de potassium.

Le calcium au contraire précipite sous forme de carbonate en se combinant au gaz carbonique dissous dans l'eau. Cette précipitation se fait chimiquement à partir d'une certaine concentration en calcium ou par voie biologique. Beaucoup d'animaux marins comme les coraux ou les mollusques sont en effet capables de former des carbonates qui constituent leur squelette externe. Le résultat en est la formation de calcaire qui s'accumule au fond des océans en quantité prodigieuse. Ces milliards de tonnes de calcaire peuvent sortir de l'eau à la suite des phénomènes d'orogénèse, c'est-à-dire des déplacements de masse qui aboutissent à l'érection de chaînes de montagne.

La formation des calcaires soustrait de l'atmosphère, comme l'accumulation de matière organique, d'énormes quantités de gaz carbonique.

Le rôle du gaz carbonique dans l'effet de serre

En dehors de ces trois aspects du cycle de carbone qui rythme la vie sur terre, le gaz carbonique joue un autre rôle tout aussi essentiel.

La plus grande partie du rayonnement solaire traverse directement l'atmosphère pour réchauffer la surface du globe. La terre, à son tour, «renvoie» cette énergie dans l'espace sous forme de rayonnement infrarouge de grande longueur d'onde. La vapeur d'eau, le gaz carbonique, et d'autres gaz comme le méthane ou le protoxyde d'azote, absorbent ce rayonnement renvoyé par la terre et empêchent l'énergie de passer directement de la surface du globe vers l'espace. Les deux principaux composés de l'air, l'azote et l'oxygène, ne jouent aucun rôle dans ce processus. L'énergie reçue s'accumule ainsi à la surface de la terre. Le rôle de ces gaz est identique à celui d'une vitre, d'où leur nom de gaz à effet de serre. Ils permettent de piéger environ 40 % du rayonnement solaire reçu à la surface du globe. Sans cette propriété, la température moyenne à la surface de la terre serait de -18° C. Dans ces conditions, la vie ne serait pas éliminée, mais serait bien différente de celle que nous connaissons. D'autres gaz interviennent comme le méthane ou le protoxyde d'azote, dont l'origine est à la fois naturelle et anthropique, et les chlorofluorocarbures(CFC), qui ont également pour effet d'appauvrir la couche d'ozone, ou les substituts aux CFC (les HFC, PFC et le SF6). Les CFC ou leurs substituts sont uniquement d'origine anthropique. On peut y ajouter les gaz précurseurs de l'ozone troposphérique : composés organiques volatils (COV), les oxydes d'azote (NOX) et le monoxyde de carbone(CO).

Le Groupe intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC) dans son second rapport approuvé en décembre 1995 confirme l'opinion de la majorité des scientifiques selon laquelle les concentrations de gaz à effet de serre s'accroissent sous l'effet des activités humaines.

L'évolution du gaz carbonique au cours du temps

Pendant très longtemps, il a été admis que l'atmosphère primitive de la terre était très réductrice (H^2 , CH^4 , NH^3). Plus tard, on a émis l'hypothèse qu'elle était proche de celle des actuelles émissions volcaniques et qu'elle était constituée d'un mélange légèrement réducteur de H^2O , CO^2 , CO , N^2 et H^2S . On estime que la teneur en gaz carbonique de l'atmosphère était à l'origine 1 000 à 10 000 fois celle qui prévaut actuellement. Les premiers organismes vivants étaient des chimiothrophes comme les actuelles bactéries méthanogènes qui métabolisent l'hydrogène et le CO^2 et produisent du méthane. Cette production de méthane et cette teneur élevée en CO^2 associée à la vapeur d'eau ont induit un

effet de serre important. Au début de la vie, la température était élevée à la surface de la terre

La photosynthèse est apparue très tôt, avant 3500 millions d'années. Elle a d'abord été anaérobie utilisant H^2 et H^2S comme donneur d'électrons. Elle est devenue aérobie entre 3 500 et 2 700 millions d'années par utilisation de l'eau comme donneur d'électrons. Cet événement a bouleversé la planète.

En effet, les cyanobactéries responsables de cette révolution se sont mises à produire de l'oxygène libre. La première conséquence a été l'oxydation du fer dissous dans l'eau de mer et la formation au fond des océans d'énormes précipitation d'oxydes de fer (Banded Iron Formations (BIFs)). Ces BIFs ont continué à s'accumuler jusqu'à moins 1 850 millions d'années (Kasting, 1993). L'oxydation complète du fer des océans aurait pris environ 700 millions d'années. Pendant cette période, comme il n'y avait pas d'oxygène libre dans l'atmosphère, il y a eu accumulation au fond des océans, mêlées aux sédiments, de grandes quantités de matière organique. En conséquence, la concentration en gaz carbonique a commencé à baisser dans l'atmosphère. Un autre phénomène a accentué cette baisse. Sous l'effet du gaz carbonique dissous dans l'eau de pluie, les minéraux primaires des continents se sont altérés, libérant dans les océans du calcium. Le gaz carbonique a ainsi été piégé sous forme de carbonate de calcium par des cyanobactéries qui ont construit les stromatolithes. Ces formations calcaires se forment encore aujourd'hui en Australie. La concentration en gaz carbonique de l'atmosphère est ainsi tombée à 100 fois la concentration actuelle.

Inversement, après complète oxydation du fer des océans, l'oxygène a commencé à être libéré dans l'atmosphère. La concentration en gaz carbonique de l'atmosphère a continué à diminuer par précipitation des carbonates dans la mer. Concomitamment, la température a baissé, ce qui est peut-être à l'origine de l'apparition des glaciations précambriennes. Selon certains auteurs, il y a 600 millions d'années, la concentration en gaz carbonique de l'atmosphère aurait alors atteint son niveau actuel, c'est-à-dire un niveau très bas. De moins 650 millions d'années à moins 450 millions d'années, elle serait remontée à huit fois le niveau actuel, peut-être en raison d'une activité volcanique accrue. Il y a 420 millions d'années, lorsque la concentration en CO_2 était d'environ huit fois la concentration actuelle, les végétaux terrestres ont brusquement colonisé les continents, ce qui a accéléré l'altération des minéraux, la précipitation des carbonates dans les océans et entraîné une nouvelle phase de baisse de la concentration en gaz carbonique atmosphérique.

D'autre part, du fait de la forte concentration en CO_2 dans l'atmosphère et de la température élevée, la production de biomasse a été considérable, en particulier par les forêts du carbonifère. La matière organique ainsi fixée s'est accumulée essentiellement sous forme de charbon et de lignite, probablement en raison de l'absence de champignons lignivores, ce qui a encore contribué à accélérer la baisse de la concentration en CO_2 atmosphérique. A la fin du Permien, la teneur en gaz carbonique était à nouveau voisine de la concentration actuelle. Une nouvelle glaciation s'est alors développée, probablement en partie en relation avec la chute de la concentration en CO_2 atmosphérique. De moins 200 à moins 100 millions d'années, la teneur en gaz carbonique et la température de l'atmosphère ont de nouveau augmenté. Les causes de cette augmentation ne sont pas évidentes. L'une d'elles pourrait être le développement pendant l'ère secondaire des champignons basidiomycètes lignivores qui n'existaient pas au carbonifère. Ils auraient ainsi remis en circulation une partie du carbone fossile et contribué à réchauffer l'atmosphère terrestre. Il y a 100 millions d'années, la concentration en CO_2 atmosphérique aurait atteint cinq à dix fois la concentration actuelle. A partir de moins 100 millions d'années, le gaz carbonique atmosphérique a de nouveau chuté essentiellement par précipitation sous forme de carbonates. Il est revenu progressivement aux valeurs actuelles, entraînant une chute continue de la température à la surface du globe. A la fin du tertiaire et pendant le quaternaire, la température est devenue suffisamment basse pour permettre l'apparition d'une série de glaciations dont les causes sont cependant d'origine diverses (réorganisation des courants marins, événements astronomiques). Cependant, l'apparition de ces très longues séries de glaciations pourrait avoir été rendue possible par la diminution de l'effet de serre, liée à la chute de la concentration en gaz carbonique atmosphérique. Les variations de concentration en gaz carbonique au cours du quaternaire sont parfaitement connues grâce aux célèbres carottages au travers de la glace du Groenland ou du continent antarctique. Pendant le quaternaire, la concentration a varié de 220 à 300 ppm. Cependant contrairement à ce qui a souvent été écrit, ces variations de concentration sont la conséquence plus que la cause des variations de température. En effet, lorsque la température s'abaisse, l'océan dissout plus de gaz carbonique et inversement. Notons que cette baisse continue de la concentration en gaz carbonique de l'atmosphère a considérablement réduit la photosynthèse qui est optimale pour des concentrations en CO_2 de 0,15%.

Nous en arrivons maintenant à la période actuelle. Depuis le début de la révolution industrielle, la concentration en gaz carbonique de l'atmosphère est passée de 280 à 365 ppm et croît d'environ 0,5 % par an

soit de 1,5 ppm. Cette augmentation est liée à la déforestation qui libère le stock de carbone fixé dans la biomasse forestière et les sols forestiers (un cinquième des émissions) et surtout à la combustion du carbone fossile, charbon, pétrole et gaz naturel, accumulés au cours des temps géologiques (quatre cinquièmes des émissions). Notons que la moitié du CO² produit par l'activité humaine contribue à son augmentation dans l'atmosphère. L'autre moitié est en effet recyclée par les processus naturels. Actuellement les émissions anthropiques de gaz carbonique sont de 6 milliards de tonnes par an, soit en moyenne une tonne par habitant et par an, avec des différences considérables entre pays. Le record est détenu par les Etats Unis avec plus de 5 tonnes par an et par habitant. Au total, ce sont chaque année trois milliards de tonnes de carbone qui ne sont pas recyclés et s'accumulent chaque année dans l'atmosphère. Ces rejets s'accroissent d'année en année. Une nouvelle augmentation de la teneur en CO² atmosphérique est donc inéluctable. Elle devrait passer dans un siècle à une valeur comprise entre 540 et 970 ppm, ce qui ne manquera pas d'avoir des répercussions sur le fonctionnement des écosystèmes terrestres. Cette augmentation n'est pas une hypothèse d'école. Elle est certaine. Seule son ampleur reste à déterminer. Elle dépendra des efforts faits pour réduire les émissions de CO² provenant de la combustion du carbone fossile et de l'utilisation de sources alternatives d'énergie.

Quelles pourraient être les conséquences de l'augmentation de la teneur en gaz carbonique de l'atmosphère ?

Les conséquences, qui sont de plusieurs ordres, sont difficiles à prédire et font l'objet de débats scientifiques contradictoires.

Augmentation de la température

Une des premières conséquences pourrait être l'augmentation de la température, à la surface de la terre. De plus d'autres gaz à effet de serre sont émis par l'activité humaine (méthane, oxydes d'azote et CFC).

La température moyenne de surface de la planète a augmenté de 0,4 à 0,8° C depuis 1860 (*Intergovernmental Panel on Climate Change*, troisième rapport, 22 10 00).

On ne peut cependant pas affirmer qu'elle est uniquement due à l'augmentation de la concentration en gaz carbonique de l'atmosphère. En effet nous ne pouvons pas complètement exclure l'hypothèse d'une phase de réchauffement naturel dû à d'autres causes et en particulier à des événements astronomiques extérieurs à la terre. D'autre part, l'évolution de la température moyenne de la terre est faite en faisant la

moyenne des stations météo disponibles. Or elles étaient peu nombreuses au dix-neuvième siècle. Enfin, certaines, qui étaient loin des agglomérations, sont maintenant incluses dans un tissu urbain, dont la température est plus élevée que celle des espaces non urbanisés. En toute rigueur, nous ne pouvons pas conclure de manière formelle à un réchauffement de l'atmosphère lié à l'activité humaine, même si plusieurs observations vont dans ce sens. On cite le plus souvent le recul des glaciers alpins au moins dans la zone externe des Alpes, la fonte de la banquise polaire, l'arrêt prolongé des oiseaux migrateurs en France comme les grues cendrées. Nous avons tous aussi l'impression que les hivers sont plus doux depuis une ou deux décennies.

Néanmoins, pour le futur, la quinzaine de modèles mathématiques différents utilisés par les climatologues prévoient une augmentation de la température moyenne du globe de + 1,5 à + 2° C entre 2 000 et 2100 en cas de doublement de la concentration de gaz à effet de serre dans l'atmosphère. Le modèle HadCM² prévoit en 2070 en Europe une augmentation moyenne de + 4° C, quelle que soit la zone géographique. Ces hypothèses sont plausibles même si les modèles sont grossiers et ne peuvent rendre compte de la complexité des mécanismes mis en jeu.

Modifications des régimes hydriques

Les régimes hydriques seront probablement eux aussi modifiés. L'ampleur de ces changements fait l'objet de débats. Il est probable que la couverture nuageuse et en conséquence les précipitations augmenteront. Mais si elles augmenteront dans certaines régions, elles diminueront dans d'autres, entraînant des sécheresses. En Europe, le modèle HadCM² prévoit dans les régions boréales une augmentation continue des précipitations qui passeraient de 600 mm en 1830 à 850 mm en 2070. Les précipitations resteraient stables en zone tempérée et diminueraient en zone méditerranéenne pour passer de 850 mm en 1830 à moins de 700 mm en 2070. Les événements atmosphériques extrêmes seront peut-être plus fréquents. Mais aucune tendance n'a cependant été décelée dans ce sens dans les régions tropicales ou équatoriales. Malgré les récentes tempêtes nous n'avons pas non plus de certitude en climat tempéré. Nous n'avons que des présomptions.

Modifications des rendements agricoles et forestiers

L'augmentation de la température, alliée à l'augmentation de la teneur en gaz carbonique de l'atmosphère qui améliore la photosynthèse, entraîne une amélioration de la production agricole et forestière, à condition que d'autres facteurs ne deviennent pas limitants. Par exemple, si la pluviosité diminue dans certaines régions, les rendements baisseront bien évidemment.

Le modèle Hybrid prévoit que d'ici 2080 la Productivité Primaire Nette des écosystèmes européens (essentiellement forestiers) doublera en zone boréale, augmentera de 40 % en zone tempérée et diminuera de 50 % dans les régions méditerranéennes. Si nous raisonnons maintenant en productivité nette de l'écosystème, c'est-à-dire en bilan de carbone, la situation reste stable pour l'ensemble de l'Europe. Mais les différences seront énormes suivant les zones climatiques. Les zones boréales vont fonctionner comme des puits de carbone en accumulant de la matière organique. Au contraire, les régions méditerranéennes vont produire du gaz carbonique par diminution de la productivité primaire nette, mais surtout par augmentation de la respiration des sols dont la matière organique va se minéraliser plus rapidement.

Des augmentations de la production de biomasse se sont déjà produites depuis la révolution industrielle. Dans tout l'hémisphère nord, la production forestière s'est considérablement accrue depuis 150 ans. Quand les premiers chiffres sont tombés vers 1985, la communauté forestière a été frappée de stupeur. Par exemple dans les Vosges, les accroissements annuels du sapin pectiné avaient augmenté en 150 ans de plus de 100% (Becker, 1989).

La prestigieuse revue internationale *Nature* a refusé de publier ces résultats, estimant qu'ils étaient invraisemblables. Les autorités forestières n'ont pas voulu non plus croire à ces résultats. Depuis, il a bien fallu se rendre à l'évidence et il n'y a même plus débat. Pour cette période, nous avons à la fois les résultats des modèles et des mesures. Tout concorde. Les forêts de l'hémisphère nord ont vu leur croissance augmenter d'au moins 30 à 40 % en un peu plus d'un siècle. Cette augmentation de croissance semble résulter uniquement d'un effet indirect de l'activité humaine : augmentation de la concentration en CO² de l'atmosphère, qui a entraîné une augmentation de la photosynthèse et pourrait être responsable de celle de la température et de la pluviosité.

Enfin, l'accroissement de la circulation automobile a provoqué d'importantes émissions d'oxydes d'azote qui sont retombées sur les écosystèmes forestiers sous forme de nitrates qui sont, comme chacun le sait, des fertilisants.

En Europe, selon le modèle Hybrid utilisé dans le programme Alterra, l'augmentation de la production forestière en forêt boréale atteindra encore 70 % en 2080 par rapport à son niveau de 1990. Pendant la même période, elle augmentera encore de 50 % en zone tempérée, mais chutera en région méditerranéenne. Les deux autres modèles utilisés donnent des résultats très proches.

Modification du niveau des mers

Selon les experts de l'IPCC (Groupe Intergouvernemental sur les Changements Climatiques), le réchauffement du climat au XX^{ème} siècle a provoqué une augmentation du niveau des océans comprise entre 10 et 20 cm. Au cours du XXI^{ème} siècle, la fonte d'une partie des glaces polaires et le réchauffement des océans pourraient entraîner une élévation du niveau des mers, que les hypothèses moyennes évaluent à 0,7 mm par an. Certains modèles prévoient + 2,2 mm et d'autres - 0,8 mm. C'est donc l'incertitude la plus complète. La première chose à faire est de construire des modèles fiables et surtout de caler les données des marégraphes. En effet, l'écorce terrestre est instable ; les marégraphes sont souvent situés dans des zones qui se soulèvent ou s'enfoncent. Un programme international, appelé TIGA (*Tide Gauge Project*), a été mis en place en 2001 à Hawaï. Son objectif est la surveillance géodésique des marégraphes à l'aide du système GPS bien connu (*Global Positioning System*).

Santé des populations

Si globalement, la production agricole pourrait augmenter, les risques de disette alimentaire et de famine pourraient s'accroître dans certaines régions de la planète : Asie du sud, de l'est, et du sud-est, régions tropicales d'Amérique Latine, Sahel en Afrique. Les vagues de chaleur pourraient être plus intenses et plus longues. Certains imaginent un accroissement consécutif des maladies cardio-vasculaires ; indirectement, un certain nombre de maladies comme le paludisme ou la fièvre jaune pourrait se transmettre plus facilement.

Modification des courants marins

Certains chercheurs envisagent la possibilité d'un ralentissement du *Gulf stream* au niveau du nord de l'océan atlantique, ce qui aurait pour conséquence un fort refroidissement de la température moyenne en Europe occidentale, alors que cette température aurait tendance à s'élever sur le reste du globe.

Il existe au moins deux types de courants marins importants :

Les courants océaniques profonds comme le *Gulf stream* qui ramène de l'eau chaude à des latitudes élevées et les courants verticaux encore appelés thermohalins. Ces deux types de courants sont interconnectés : les courants thermohalins servent de moteur à la circulation océanique profonde. Or ces courants verticaux ou convectifs sont très sensibles à de petites variations de température. Par exemple, le phénomène El Niño commence dans une région du Pacifique, par un réchauffement modeste de + 2 ou + 3° C de la température de surface qui affecte la circulation thermocline et provoque par enchaînement de fortes perturbations.

Si par suite d'un réchauffement local, ces courants verticaux s'arrêtent, ils pourraient entraîner l'arrêt des courants océaniques profonds. Cette hypothèse de ralentissement de la circulation thermohaline est prise très au sérieux. Il semble bien en effet que dans le passé le *Gulf stream* se soit arrêté pour ces raisons. Mais pour l'avenir, nous restons toujours dans le domaine des hypothèses.

Malgré l'absence de certitudes scientifiques, les principaux gouvernements ont décidé de tenter de lutter contre l'effet de serre.

Les actions internationales de prévention du changement climatique

Adoptée le 9 mai 1992 à New-York et signée à compter du 4 juin 1992 dans le cadre de la convention des Nations Unies sur le développement de Rio de Janeiro, la convention-cadre sur les changements climatiques est entrée en vigueur le 21 mars 1994. Elle a été signée par 178 Etats, plus l'Union européenne.

Son objectif principal est défini dans l'article 2: *stabiliser les concentrations de gaz à effet de serre à un niveau qui empêche toute perturbation anthropique dangereuse du système climatique.*

Elle assigne des obligations particulières aux pays développés. Ils doivent mettre en œuvre des mesures permettant de ramener individuellement ou conjointement à leurs niveaux de 1990 leurs émissions de gaz carbonique et d'autres gaz à effet de serre non réglementés par le protocole de Montréal sur la protection de la couche d'ozone.

Cette convention prévoit la tenue de conférences ayant pour but d'examiner si les engagements prévus sont conformes à l'évolution de l'état des connaissances scientifiques et de fixer par voie d'amendement des engagements nouveaux.

Lors d'une première conférence qui s'est tenue à Berlin en avril 1995, les Etats ont estimé que les engagements de Rio devaient être modifiés. Lors de la troisième réunion à Kyoto, ils ont décidé d'adopter un protocole dans lequel les pays développés s'engageraient sur des objectifs quantifiés avec des calendriers de réduction d'émission de gaz à effet de serre.

La seconde conférence de Genève en juillet 1996 a prévu que ces objectifs seraient juridiquement contraignants.

La conférence de Kyoto a abouti, le 10 décembre 1997, à l'adoption d'un protocole prévoyant de commencer immédiatement à réduire les émissions de gaz à effet de serre. Le taux moyen de réduction consenti pour les principaux pays industrialisés est de - 5,2 % par rapport au niveau de 1990.

Depuis Kyoto, d'autres conférences se sont tenues avec plus ou moins de succès à Buenos Aires, La Haye ou Bonn. La dernière a été un échec. Depuis, le coup de grâce a été porté par les Etats Unis d'Amérique, qui, après l'élection de Georges W. Bush, ont décidé de ne pas appliquer leurs engagements pris à Kyoto.

Néanmoins, l'Union Européenne et quelques autres pays tentent de poursuivre, au moins en apparence, une politique de réduction des gaz à effets de serre par trois moyens : les économies d'énergie, le plus grand recours aux énergies dites renouvelables (solaire, énergie éolienne, énergie hydroélectrique) et la création de nouveaux puits de carbone

Lors de la conférence de La Haye, qui s'est tenue fin 2000, les Etats ont pour la première fois envisagé d'avoir recours aux puits de carbone, c'est-à-dire à des méthodes permettant de soustraire du gaz carbonique de l'atmosphère. Celui qui a eu le plus de succès est celui qui fait appel aux forêts. Si on reboise un sol en friche, un sol érodé ou un ancien sol agricole, du carbone est stocké sous forme de bois et d'aiguilles pour les résineux. D'autre part sous la forêt, les sols s'enrichissent en matière organique. C'est l'effet inverse de la déforestation. Cependant, une forêt ne peut fonctionner en puits de carbone que pendant le temps où elle s'accroît. A maturité ou à l'équilibre, elle produit autant de gaz carbonique qu'elle en fixe. En terme plus scientifique, la productivité nette de l'écosystème en carbone est égale à zéro. Actuellement les chercheurs essaient de modéliser les entrées et les sorties de gaz carbonique dans les différents écosystèmes, forestiers ou non, de façon à pouvoir fournir aux décideurs des données fiables. En 1997, en Europe au sens large, la fixation moyenne de carbone par les écosystèmes naturels a été de 548 kg par hectare et par an. En France, elle était de un peu plus de 3 tonnes. En Norvège, où il y a beaucoup de forêts proches de l'équilibre, elle n'était plus que de 216 kilogrammes. Actuellement on reboise en France 25 000 hectares par an. En prenant comme référence les résultats du programme Alterra, nous pouvons estimer que la fixation nette de carbone est de l'ordre de 3 tonnes par hectare et par an dans ces plantations, ce qui correspond à 75 000 tonnes de carbone fixé par an. Nous rejetons 1,8 tonnes de carbone par an et par habitant. Ces nouvelles plantations fixent donc 0,14 % de ce que nous rejetons et que nous ne recyclons pas. Ces calculs grossiers ont au moins l'avantage de relativiser l'usage que l'on peut faire des reboisements considérés comme puits de carbone.

Certains pensent à d'autres puits, mais leur mise en oeuvre semble aléatoire, voire dangereuse ou relever de l'irresponsabilité.

Conclusions

Si l'activité humaine est responsable de l'augmentation récente de la teneur en gaz carbonique de l'atmosphère, les conséquences qui peuvent en découler restent encore dans le domaine de l'incertitude. Les connaissances scientifiques progressent, mais restent encore très fragmentaires en raison de la complexité des mécanismes mis en jeu. La communauté scientifique, bien que partagée, a réussi à mobiliser les médias et les décideurs politiques qui sont les artisans des accords internationaux de réduction des émissions de gaz carbonique. Mais suivant l'importance des partis écologiques et de l'influence qu'ils ont sur l'opinion publique, la situation est extrêmement différente suivant les pays.

Les Etats-Unis qui sont les premiers producteurs de gaz carbonique de la planète conduisent une politique volontariste de protection de l'environnement, mais pas à n'importe quel prix. S'ils ont par exemple décidé de mettre en réserve naturelle la quasi totalité des forêts fédérales, ce qui est un acte politique très fort, ils ne veulent à aucun prix des règles internationales qui mettraient en péril leur industrie. La décision récente du Président Georges W. Bush de ne pas tenir les engagements américains de Kyoto ou de mettre en exploitation les réserves pétrolières de l'Alaska est très significative. D'autre part les Etats Unis préfèrent faire jouer en matière d'énergie les lois du marché tout en introduisant des incitations financières plutôt que de réglementer en fixant des normes d'émission.

La politique européenne est différente, mais variable d'un pays à l'autre. L'Allemagne considère que chaque pays doit apporter une réponse modulée en fonction de sa situation et de ses sources d'énergie. Mais sous la pression des écologistes, qui craignent plus le nucléaire que les effets possibles de l'effet de serre, l'Allemagne vient de décider de mettre en place une politique énergétique qui va conduire à l'abandon total du nucléaire et par conséquent à une augmentation de la production de CO². De même le refus de limiter la vitesse sur autoroute ou la mise sur le marché de voitures puissantes ne vont pas dans le sens d'une réduction de l'effet de serre. La Suède est un pays qui privilégie la protection de l'environnement. Cela ne l'empêche pas comme l'Allemagne d'abandonner ses centrales nucléaires. Les Anglais qui ont un parc de centrales thermiques important ne pensent pas que le nucléaire soit une solution alternative et privilégie les économies d'énergie traditionnelle. La France est dans une situation très particulière avec un parc de centrale nucléaire unique au monde. Malgré la pression des écologistes, il n'est pas question de l'abandonner. La France veut cependant favoriser les énergies renouvelables et les économies d'énergie qui sont à la fois source de nouvelles technologies et source d'emploi. Une directive euro-

péenne concernant la production d'électricité devrait voir le jour en 2002. Elle préconisera d'atteindre 22 % de la production d'électricité par de l'énergie renouvelable. C'est un objectif louable, mais probablement irréaliste.

Le Japon est attentiste et veille à ce qu'aucune réglementation ne vienne entraver la compétitivité de son industrie. A la récente conférence de Bonn où les différents pays ont tenté de mettre en pratique les accords de Kyoto, le Japon a réussi à obtenir une réduction très substantielle de ses quotats.

La Chine et l'Inde, les deux pays les plus peuplés de la planète, sont déjà de très gros émetteurs de CO² en raison de leur énormes ressources en charbon et de leur population. Le nécessaire développement de leur économie n'ira pas sans une augmentation de leurs émissions. La situation des autres pays en voie de développement est très hétérogène. Mais en dehors de quelques exceptions, leur consommation d'énergie fossile est faible. Leur développement économique passe par une augmentation des émissions. On voit combien la situation est difficile au niveau international et on comprend la difficulté d'arriver à de véritables accords. En réalité, pour éviter d'imposer à leur population des changements qui pourraient mettre en péril leur niveau de vie, les pays industrialisés déploient des trésors d'ingéniosité pour contourner les accords, ou, comme les Etats Unis, se retirent tout simplement.

Il n'y a pas lieu d'être optimiste sur les possibilités de diminution des émissions de gaz carbonique dans le siècle que nous venons de débiter. Il est probable que c'est l'hypothèse haute qui sera vérifiée en 2100, soit une teneur en CO² de l'atmosphère de l'ordre de 1000 ppm ou de un pour mille ou de 0,1%.

Des événements imprévisibles peuvent évidemment se produire d'ici là. L'utilisation de la matière organique fossile comme source d'énergie ne va durer qu'un temps très court. C'est par définition une énergie non renouvelable qui s'épuise irrémédiablement lorsqu'on l'exploite. Les experts sont peu précis sur les échéances. Les réserves de gaz et de pétrole pourraient permettre de tenir encore 50 à 100 ans, mais une crise des approvisionnements peut se produire beaucoup plus tôt. Les réserves de charbon seraient de plusieurs siècles. Mais une chose est certaine, l'humanité, si elle veut survivre et assurer un niveau de vie convenable à tous les habitants de la planète, devra trouver d'autres solutions. Les énergies dites renouvelables (biomasse, solaire, hydroélectrique et énergie éolienne) ne peuvent fournir que quelques pour cents de l'énergie dont nous avons besoin. L'énergie géothermique a probablement un brillant avenir, mais son développement ne peut se faire que dans des situations privilégiées.

Le recours aux centrales nucléaires classiques se heurte partout à l'hostilité des populations et ne constitue ou ne constituerait qu'un relai de courte durée. Les gisements d'uranium sont en effet limités au niveau de la planète. Le recours au thorium pourrait prolonger la période d'utilisation de l'énergie de fission. Le recours à la surgénération, qui avait fait naître de sérieuses espérances il y a une ou deux dizaine d'années, n'est plus envisageable en raison des risques énormes encourus. Tous les pays ont d'ailleurs, à l'image de la France, abandonné le développement de cette filière.

Il reste la fusion nucléaire, c'est-à-dire l'énergie libérée par la combinaison de deux noyaux légers pour former un noyau unique plus lourd. C'est cette énergie inépuisable qui est produite depuis cinq milliards d'années par le soleil ou les étoiles en général. Mais pour que la réaction de fusion puisse se déclencher, il faut atteindre des températures énormes. Sur terre, les physiciens ont réussi à obtenir cette réaction dans les bombes thermonucléaires. La température de fusion de l'hydrogène lourd, deutérium ou tritium, est obtenue par une réaction nucléaire classique de fission du noyau d'uranium 238 (bombe A).

Pour obtenir une réaction de fusion maîtrisée et non explosive, les problèmes à résoudre sont énormes. Il faut confiner la réaction, alors qu'aucun récipient ne peut résister à de telles températures. Il faut donc envisager un confinement d'un plasma sans contact. Deux voies sont explorées par les physiciens : le tokamak et la fusion laser. Dans le tokamak, les particules chargées sont confinées par un champ magnétique à l'intérieur d'un tore. Aucune réaction thermonucléaire auto entretenue n'a pu encore être obtenue dans ce type d'appareil. Aucune échéance ne peut être donnée à l'heure actuelle. En 1980 on parlait d'une réussite en 2000. Aujourd'hui on parle de possibilité d'exploitation en 2020.

Dans la fusion laser, le confinement du plasma est obtenu par balayage d'un grain de combustible sur toute sa surface par des faisceaux lasers. La faisabilité de la fusion thermonucléaire par cette méthode n'a pas encore été démontrée.

Après cette courte période de développement fulgurant de deux à trois siècles, basée sur l'utilisation de l'énergie fossile, l'avenir de l'humanité est entre les mains de ses physiciens et de ses mathématiciens. Nous ne pouvons que leur souhaiter la plus grande réussite.

Discussion

Après les remerciements du Président, à la suite d'une question de M. Gérard, M. Le Tacon réfute le mythe du «poumon» amazonien. Diminué, libérateur de CO², il a vraisemblablement accru sa productivité, dans une mesure non vérifiable. M. Bonnefont décrit un système dans lequel le CO² laisse passer les rayons solaires, mais intercepte en retour le rayonnement terrestre. Il note toutefois que ce système n'est pas entièrement fermé, compte tenu de la part du volcanisme et de la part du CO² qui, plus lourd que l'air, pourrait pénétrer profondément dans le sol. M. Le Tacon acquiesce et M. Sadoul rappelle à ce propos l'abaissement de température provoqué par les cendres de l'explosion du Mont Saint-Élie dans l'Orégon.

M. Larcen souligne le rôle probable de la déforestation, mais aussi des grands incendies de forêts, le rôle possible des éruptions volcaniques (2 000 victimes plus le bétail, au Cameroun). Il note les présentations très différentes des scénarios de catastrophes suivant la tendance des journaux, l'intérêt des centrales nucléaires françaises peu polluantes et exprime son regret de l'arrêt des surgénérateurs expérimentaux. Notre communicant répond que ces derniers sont considérés comme trop dangereux et M. Fléchon pose à ce propos la question des déchets nucléaires et des énergies renouvelables et de fusion.

A M. Bur, qui demande si l'on a établi des scénarios concernant les modifications entraînées par une croissance importante du CO² dans la vie et dans le monde, il est répondu qu'elles n'auraient pas trop de conséquences en zone tempérée, mais beaucoup dans les pays chauds (accroissement de la pauvreté, flux migratoires, etc). Attentif aux dangers suscités par la modification des courants marins, le président apprécie d'entendre que la défense de l'environnement vient d'être prônée aux Etats-Unis. A M. Vicq, il répond que les taux, modestes, d'augmentation du CO² n'accroissent pas les risques vitaux.

Bibliographie

- ☞ Becker M., 1989. The role of climate on present and past vitality of silver fir forests in the Vosges mountains of northeastern France. *Canadian Journal of Forest Research*, 19 : 1110-1117.
- ☞ Berner R. A., 1991. A model for atmospheric CO₂ over Phanerozoic time, *Amer. J.* 291, 339-376.
- ☞ Dupouey J.-L., Pignard G., Badaud V., Thimonier A., Dhôte J.F., Nepveu G., Bergès L., Augusto L., Belkacem S., Nys C., 2000. Stocks et flux de carbone dans les forêts françaises, *Revue Forestière Française*, 52, 139-154.
- ☞ Global Change Data Center <http://tsdis.gsfc.nasa.gov/gcdc/gcdc.html>
- ☞ Hamon J., 2001. Implications de la prochaine crise de l'énergie pour l'occupation et l'exploitation des sols en France métropolitaine. *Courrier de l'environnement de l'INRA*, 44, 73-77.
- ☞ Intergovernmental Panel of Climate Change <http://www.ipcc.ch/>
- ☞ IPCC/DDC, 2000. Intergovernmental Panel of Climate Change, data Distribution Centre ; scenario gatte http://ipcc-ddc.cru.uea.ac.uk/cru_data/cru_index.html.
- ☞ IPCC Special Report on Emissions Scenarios <http://www.grida.no/climate/ipcc/emission/023.htm>
- ☞ Kasting J. F., 1993. Earth's Early Atmosphere, *Science* 259, 920-926.
- ☞ Kramer K. and Mohren G.M.J., 2001. Long-term effects of climate change on carbon budgets of forêts in Europe. *Alterra-report 194*, Wageningen.
- ☞ Lasaga A. C., Soler J. M., Ganor J., Burch T. E. and Nagy K. L., 1994. Chemical weathering rate laws and global cycles, *Geochemica et Cosmochimica Acta* 58 10 (1994) 2361-2386.
- ☞ Lepetit J.-P., 1992. L'effet de serre, Interéditiions.
- ☞ Mohren G.M.J., 2001. Long-term effects of CO₂ increase and Climate Change on European Forests. *Proceedings EU-Climate Conference*, Orvieto.
- ☞ US Global Change Research Information Office, <http://www.gcrio.org/index.shtml>.