



**Petit déjeuner de presse**

**8 novembre 2000**

**Le climat :  
variabilités et évolution future**



Corinne Borel : ☎ 01 40 56 18 35

Contacts presse

Karine Deffis : ☎ 01 40 56 14 88

## Sommaire

- Liste des intervenants
- Le réchauffement climatique
- Variabilité naturelle du climat
- Prévisions du climat futur :modélisations et incertitudes...
- Le cycle du carbone : comment mieux connaître les échanges de CO<sub>2</sub> à la surface de la terre?
- Présentation des instituts LSCE IPSL LMD
- Repères chronologiques
- Quelques chiffres
- Glossaire



## INTERVENANTS

### **Philippe Ciais**

Unité Mixte CEA-CNRS - laboratoire des sciences du climat et de l'environnement (LSCE)  
CEA/Saclay

### **Jean Jouzel**

Unité Mixte CEA-CNRS - laboratoire des sciences du climat et de l'environnement (LSCE)  
CEA/Saclay

### **Hervé Le Treut**

Laboratoire de météorologie dynamique (LMD)  
Université Pierre et Marie Curie et ENS

## Le réchauffement climatique

### Le Protocole de Kyoto

Sous l'égide de l'ONU, 184 pays engagés dans la lutte contre le réchauffement climatique doivent se réunir du 13 au 24 novembre prochain à La Haye, aux Pays-Bas, afin de finaliser les modalités d'application pratiques du protocole de réduction des gaz à effet de serre, signé à Kyoto en décembre 1997.

Ce protocole impose à 38 pays occidentaux et en transition vers l'économie de marché de **réduire de 5,2 % en moyenne leurs émissions de gaz à effet de serre entre 2008 et 2012** par rapport au niveau de 1990. Les contraintes sont différentes selon les pays. Les Etats-Unis devront ainsi réduire leurs émissions de 7 % (-7%) par rapport à 1990, l'Union européenne de 8 % (-8 %), mais avec des différenciations en son sein. Ainsi, l'Allemagne a un objectif de réduction de ses émissions fixé à 21 % (-21 %), tandis que la France doit se contenter de maintenir son niveau de 1990 (0 %).

**Ces mesures visent 6 gaz** : le dioxyde de carbone (CO<sub>2</sub>), le plus important pour l'effet de serre, le méthane (CH<sub>4</sub>), l'oxyde nitreux (N<sub>2</sub>O) et, dans une bien moindre mesure, 3 gaz fluorés : les hydrofluorocarbones (HFC), les hydrocarbures perfluorés (PFC) et l'hexafluorure de soufre (SF<sub>6</sub>).

Avant d'entrer en vigueur, le protocole de Kyoto devra être ratifié par 55 pays, d'ici à 2002, représentant au moins 55 % des émissions de CO<sub>2</sub> du monde développé.

Seuls 23 pays (au 7 Août 2000) l'ont ratifié à ce jour.

### Quel est l'enjeu de ce protocole ? Qu'est-ce que l'effet de serre ?

L'effet de serre atmosphérique est une composante majeure du bilan radiatif de la Terre. Absorbant une partie des rayonnements infrarouges émis par le sol, **il permet à la planète d'afficher une température moyenne de 15°C contre -18°C** si l'air était transparent à ces radiations. L'effet de serre « naturel » est donc en soi très bénéfique. Mais c'est son augmentation, qui provoque un « effet de serre additionnel », venant s'ajouter à l'effet de serre naturel, qui inquiète. Le système se trouve ainsi

déséquilibré : **les gaz à effet de serre s'accumulent, ils ne s'éliminent pas.**

Depuis le début de l'ère industrielle, la quantité de gaz à effet de serre rejetée dans l'atmosphère a considérablement augmenté, en raison principalement de l'utilisation des combustibles fossiles, c'est-à-dire le charbon, le pétrole et le gaz naturel. Cette augmentation de gaz à effet de serre réchauffe le fond de l'air, en absorbant trop de rayonnement infrarouge. **La concentration en dioxyde de carbone, qui a augmenté de 30 % en 100 ans, a ainsi causé un excès de 1,5 W/m<sup>2</sup> à la surface de la terre, soit 60 % de l'effet de serre additionnel depuis le début du siècle.**

La modification de la composition chimique de l'atmosphère depuis le début de l'ère industrielle est sans équivalent au cours de l'ère quaternaire, tant par son amplitude que par la vitesse des évolutions constatées. C'est ce que montrent sans ambiguïté les analyses effectuées à partir d'échantillons de glace polaire, ou les mesures directes effectuées au cours des dernières décennies dans un nombre croissant d'observatoires. **Certains gaz déjà présents dans l'atmosphère ont vu leur concentration augmenter de manière considérable.** Le dioxyde de carbone a ainsi vu sa teneur augmenter de 270 ppm (parties par million, cette unité correspond à une fraction volumique en millionième) à 360 ppm environ. La concentration en méthane a plus que doublé ( + 145 % depuis 1750). Des composés nouveaux ont fait leur apparition, tels les CFC (chlorofluorocarbones). Cette modification de la composition de l'atmosphère peut avoir des effets multiples. L'augmentation de l'ozone troposphérique, par exemple, principalement en milieu urbain, pose un problème de santé. Le dioxyde de carbone (CO<sub>2</sub>) atmosphérique agit directement sur les conditions de croissance de la végétation. **Le souci le plus grave reste néanmoins celui d'une modification globale du climat de la planète.** La durée de vie des gaz injectés dans l'atmosphère est souvent longue de quelques décennies, pour autant qu'on la connaisse avec précision, ce qui n'est pas toujours le cas, et leur action peut devenir irrémédiable. Les actions de prévention doivent donc être conduites avec beaucoup d'anticipation, dans une situation où le contexte scientifique n'est pas complètement figé.

Les scientifiques s'interrogent encore aujourd'hui sur le poids respectif des différents gaz dans le renforcement de l'effet de serre. Une chose est certaine néanmoins : **le CO<sub>2</sub> est à lui seul responsable de 50 % de l'augmentation de l'ensemble des gaz à effet de serre.** Par ailleurs, les HFC, s'ils sont répertoriés comme des gaz à effet de serre dans le protocole de Kyoto, constituent une solution au problème de la diminution de l'ozone stratosphérique et leur développement industriel est donc recommandé par la Convention de Montréal pour la protection de la couche d'ozone. La contradiction entre les effets bénéfiques/négatifs est donc problématique.

### Ce qui est acquis aujourd'hui

Il est acquis aujourd'hui que la planète se réchauffe (+0,5°C sur le siècle dernier) et que l'accroissement continu des concentrations de gaz à effet de serre dans l'atmosphère a une part de responsabilité dans le réchauffement observé. Il est également indéniable que les hommes, du fait de leur activité de production industrielle et de l'émission de gaz qui en découle, vont être à l'origine d'un réchauffement climatique. Les températures moyennes devraient s'accroître, au cours des cent prochaines années, de 1 à 3,5° Celsius (rapport 1995 du Giec ; ces valeurs sont actuellement revues à la hausse). Même si l'on parvient à stabiliser nos émissions de gaz carbonique, la température moyenne sur Terre augmentera inévitablement.

Les rapports du Groupe intergouvernemental pour l'étude du changement climatique (Giec-IPCC), et plus particulièrement celui de 1995, traduisent ce **consensus scientifique : un faisceau d'éléments suggère une influence perceptible de l'homme sur le climat ; l'accroissement des gaz à effet de serre est pour partie responsable du réchauffement observé.**

Il importe aujourd'hui d'en préciser l'importance quantitative et surtout de détecter avec précision cette tendance au

réchauffement, en déterminant notamment sa répartition géographique. Il est en effet difficile de dire quelles seront les répercussions de ce réchauffement sur des aires géographiques données, car il est probable que le réchauffement climatique ne sera pas uniforme.

### L'étude du climat : observer le passé pour prévoir le futur

La science du climat est encore jeune et le système climatique complexe. **Par l'étude du climat du passé, par la compréhension du cycle du carbone et par la modélisation numérique des données, les scientifiques parviennent à mieux appréhender cette complexité.**

Des forages effectués dans les sédiments du fond des mers et dans les calottes glaciaires des pôles fournissent aux chercheurs de précieux indices pour reconstituer les épisodes climatiques du passé. Cette meilleure connaissance du climat du passé permet de replacer dans un contexte plus large les variations climatiques et apporte un soutien aux modèles numériques.

Ces derniers ont été bâtis pour rendre compte du climat actuel et tenter d'en prévoir les variations.

A l'aide de modèles numériques, il est possible de simuler le climat sur des périodes de plus en plus longues et de faire ainsi mieux la part entre sa variabilité naturelle et celle liée à l'action de l'homme.

Par ailleurs, le changement climatique pourrait influencer sur le stockage du carbone : actuellement, la moitié des émissions reste dans l'atmosphère. L'autre partie est stockée par les océans et les forêts. Or, il est possible que le réchauffement du climat réduise les possibilités de stockage dans les profondeurs marines et la végétation. D'où l'intérêt d'étudier le cycle du carbone, notamment dans la perspective de la création de puits de carbone biosphériques.

## Variabilité naturelle du climat

Afin de déterminer avec précision le rôle des gaz à effet de serre et par là même l'influence de l'activité humaine dans les changements climatiques présents et futurs, il est avant tout important de bien connaître le climat du passé. En particulier, la variabilité naturelle du climat, à différentes échelles de temps, doit être connue pour pouvoir en appréhender correctement l'évolution future.

Depuis une dizaine d'années, l'étude du climat du passé, en particulier l'analyse de carottes de glace, a pu mettre en évidence une relation entre effet de serre et climat depuis 420 000 ans, ainsi que l'existence de variations climatiques rapides. Par ailleurs, la reconstitution des variations climatiques récentes montre que la dernière décennie du XXème siècle est la plus chaude du dernier millénaire.

- **Variabilité glaciaire et interglaciaire**

Les calottes polaires du Groenland et de l'Antarctique constituent la majeure partie de la cryosphère et représentent plus de 90 % du volume d'eau douce de la planète. Elles sont les points froids de la planète et interagissent avec le climat global. Une instabilité de ces calottes peut perturber la circulation océanique et le climat.

L'analyse des couches de neige nous informe sur les conditions de formation des précipitations. La teneur isotopique de la glace (deuterium, oxygène) permet de remonter à une estimation moyenne de la température locale. La géochimie des poussières minérales permet de remonter aux régions désertiques ou aux volcans qui ont explosé.

L'étude des gaz emprisonnés dans les bulles donne la composition de l'atmosphère ancienne. C'est ainsi que l'on a pu mettre en évidence **l'augmentation notable, depuis l'ère industrielle, des taux de CO<sub>2</sub> (+ 30 %) de méthane CH<sub>4</sub>(+ 145 %) ou encore de dioxyde d'azote (+15 %).**

Les carottages dans la glace révèlent des enregistrements continus de l'environnement passé au cours des derniers cycles climatiques, enregistrements dont la représentativité n'est pas limitée à l'aspect local ou régional.

**Le forage de Vostock, en Antarctique est exemplaire : un enregistrement climatique a pu être réalisé sur 420 000 ans.**

Pendant les 4 grands cycles, les caractéristiques de l'atmosphère ont varié, avec une amplitude de variation de température de l'ordre de 12°C au niveau du sol et de 8°C à hauteur de la troposphère. Les analyses des bulles de gaz emprisonnées dans la glace sur l'ensemble de cette période ont montré que **les concentrations en gaz à effet de serre sont corrélées à la température antarctique sur l'ensemble de la période étudiée.** Les climats interglaciaires sont caractérisés par des teneurs en CO<sub>2</sub> de l'ordre de 280 ppm, alors qu'en période glaciaire, l'atmosphère ne contenait que 180 ppm. Le méthane oscille, quant à lui, entre 700 et 350 parties par milliards, entre les périodes chaudes et froides respectivement. Ces données sont particulièrement importantes pour évaluer la « sensibilité du climat » à la teneur en gaz à effet de serre et la prendre en compte dans les modèles de simulation du climat futur.

Il faut souligner que l'une des grandes difficultés des paléoclimatologues réside dans le fait qu'ils ne disposent pas de méthode de datation absolue (elle l'est à environ 10 % près et les incertitudes relatives restent importantes (environ 1000 ans), même lorsque l'on veut comparer des enregistrements obtenus dans les bulles et la glace d'une même carotte. Une méthode nouvelle basée sur les anomalies isotopiques de l'argon devrait permettre de contourner cette difficulté ; des premiers résultats sont présentés.

Les enregistrements paléoclimatiques contiennent également des informations sur les mécanismes du climat.

Les résultats des forages effectués à Vostock confirment l'idée selon laquelle les variations climatiques sont initiées par les changements orbitaux de la terre et largement amplifiées par les gaz à effet de serre.

Les études réalisées sur des sédiments marins, comme sur les carottes glaciaires, ont montré que **le climat était relié** non seulement aux variations du rayonnement solaire, mais aussi et surtout **aux changements de la circulation océanique.** Les **mécanismes de transmission de la « machine climatique »**

**entre les hémisphères nord et sud** se révèlent sur ce point **capitaux**.

Les paléoclimatologues portent actuellement une attention particulière aux **rôles respectifs de l'atmosphère et de l'océan dans ces mécanismes**.

Hormis le rôle fondamental de la circulation océanique, les variations climatiques passées montrent également l'importance de la **biosphère**, puisqu'elle modifie le taux de réflexion des rayonnements solaires, elle influence aussi énormément les quantités de gaz à effet de serre dans l'atmosphère.

- **Variations brutales du climat**

L'étude des carottes glaciaires du forage de Vostock dans l'Antarctique a mis en évidence des **variations climatiques rapides au cours de la dernière période glaciaire et de la transition**, qui a conduit, il y a un peu plus de 10 000 ans, au climat actuel. Ainsi, des **réchauffements de l'ordre de 10 °C se sont produits au centre du Groenland en quelques dizaines d'années** ; les changements du taux de précipitation et de la circulation atmosphérique qui les ont accompagné se révèlent également importants et encore plus brusques. Le retour vers des conditions froides s'est alors fait lentement, puis plus rapidement. Ces séquences en « dents de scie » d'une durée de 500 à 2 000 ans se sont répétées une vingtaine de fois au cours de la dernière période glaciaire. Des résultats récents montrent que ces variations ne se sont pas limitées au Groenland, qu'elles sont liées à des changements de circulation océanique et qu'elles ont visiblement influencé le climat de l'hémisphère nord dans son ensemble.

Il est également possible que des instabilités se soient produites au cours de la dernière période interglaciaire (il y a 125 000 ans).

Ces observations montrent qu'il est **possible que des fluctuations de grande ampleur surviennent dans le futur, de façon inattendue**. De tels événements seraient synonymes de véritables bouleversements climatiques, dont il faut tenir compte dans l'évaluation du climat futur.

- **Variabilité et climat récent**

Depuis le dernier rapport du Giec publié en 1995, de nouvelles données sur le climat récent ont permis une meilleure connaissance pour les 1000 dernières années. L'analyse des

mesures fournies par un réseau mondial de stations climatologiques indique que **le siècle dernier aurait connu un réchauffement général moyen de l'ordre de 0,3 à 0,6 °C**.

**L'évolution la plus marquée a eu lieu dans la dernière décennie, et celle-ci a été probablement la plus chaude du dernier millénaire.**

La température moyenne de l'air au XXème siècle est la plus élevée depuis l'an 1400.

Ce réchauffement séculaire s'est accompagné d'autres phénomènes caractéristiques :

- Les températures nocturnes ont généralement augmenté plus que les températures diurnes ;
- Le niveau des mers s'est élevé de 10 à 25 cm au cours du dernier millénaire et cela principalement à cause de l'expansion thermique des océans et de la fonte des glaciers ;
- C'est dans les régions continentales de latitudes moyennes, en hiver et au printemps, que le réchauffement climatique récent a été le plus prononcé ;
- La quantité des précipitations s'est accrue sur les continents aux latitudes élevées de l'hémisphère nord, surtout pendant la saison froide ;
- A l'échelle régionale, il existe des indications claires de l'évolution de certaines conditions extrêmes et de la variabilité du climat. Mais ce n'est pas généralisable à l'échelle globale.

Des mesures complémentaires sont en cours pour compléter les données climatiques, en particulier dans les régions océaniques. Des chercheurs ont récemment obtenu, à partir des glaces du Groenland, un enregistrement qui témoigne des variations de température de l'Atlantique Nord au cours des 1 000 dernières années et indique que ces régions océaniques ont connu une période de refroidissement au moment du petit âge glaciaire (XVI-XIXème siècle).

**Toutefois, la mise en évidence d'un réchauffement marqué ces dernières années vient corroborer l'hypothèse selon laquelle le réchauffement observé n'est vraisemblablement pas d'origine uniquement naturelle.**



## Prévisions du climat futur : modélisations et incertitudes...

Depuis le début de l'ère industrielle, la composition chimique de la planète a subi une évolution brutale sans précédent : la teneur en gaz à effet de serre (GES) a augmenté très fortement : celle en CO<sub>2</sub> est passée de 280 ppm en 1750 à plus de 360 ppm aujourd'hui, la concentration en méthane a plus que doublé, des composés nouveaux ont fait leur apparition, tels les CFC ou oxydes d'azote. Tous ces gaz ayant un temps de recyclage relativement long, ils ont tendance à s'accumuler dans l'atmosphère.

Cette accumulation conduit inéluctablement à une modification de la température et par là même du climat.

Mais comment quantifier ces variations et leur influence sur le climat ? Dans quelle mesure peut-on prévoir le climat de demain ?

La réponse du **système climatique à l'augmentation de l'effet de serre dépend de phénomènes extrêmement complexes, dont les climatologues n'ont qu'une connaissance partielle. Ces recherches nécessitent en outre des simulations très lourdes**, rendues possibles il y a seulement quelques années grâce au développement des gros calculateurs.

### Quel climat pour demain ?

Si on connaît la teneur actuelle des gaz à effet de serre dans l'atmosphère, leur **teneur pour le siècle à venir dépendra d'un nombre de paramètres scientifiques, mais aussi sociologiques et économiques, très complexes.**

Aussi, le Giec a établi un ensemble de scénarios d'émissions de ces gaz à effet de serre, basés sur différentes hypothèses concernant le développement démographique et économique de la planète, l'exploitation des sols, les progrès technologiques et l'approvisionnement énergétique, et la façon dont les différentes sources d'énergie ont contribué de 1900 à 2000 et contribueront à cet approvisionnement entre 2000 et 2100.

A partir de la connaissance du cycle du carbone et de la chimie de l'atmosphère, les chercheurs peuvent évaluer, pour ces différents scénarios, l'évolution de la concentration atmosphérique des GES et aérosols. Les modèles climatiques peuvent ensuite être utilisés pour prédire l'évolution future du climat.

**Dans tous les scénarios, la teneur de ces gaz dans l'atmosphère continuera à augmenter le siècle prochain** : même dans un scénario correspondant à une stabilisation, voire à une diminution des émissions de gaz à effet de serre, la teneur en CO<sub>2</sub> dans l'atmosphère aura plus que doublé en 2100. Tout simplement parce que le CO<sub>2</sub> met plusieurs centaines d'années pour se recycler.

Cet accroissement conduit, si l'on tient compte de tous les gaz à effet de serre (dont l'ozone) et des aérosols, à un apport énergétique de l'ordre de 4 à 8 W/m<sup>2</sup> : une perturbation faible si on sait que le rayonnement solaire moyen absorbé qui régule notre climat est de 240 W/m<sup>2</sup>, mais qui peut modifier le climat de quelques degrés : un apport énergétique de 4 W/m<sup>2</sup>, qui correspond au **doublage de la teneur en CO<sub>2</sub>, aurait un effet direct d'augmentation globale de la température de l'ordre de 1,2°C.**

En fait l'évaluation de la température est beaucoup plus complexe, car **l'augmentation de température modifie elle-même le cycle du carbone** (la végétation ou les océans piègent moins le carbone quand la température augmente) et **la distribution des autres gaz à effet de serre, comme la vapeur d'eau.**

Ainsi, par exemple, le réchauffement de l'atmosphère se transmet peu à peu à l'océan, créant un accroissement de l'évaporation et une diminution de la glace de mer. L'une et l'autre amplifient le réchauffement initial en augmentant la teneur en vapeur d'eau atmosphérique et en réduisant les surfaces fortement réfléchissantes. Le rôle des surfaces continentales, de l'aménagement et de la ressource en eau des sols est aussi très

important. Et surtout **les modifications induites au niveau des nuages sont encore très mal connues** et peuvent avoir des effets antagonistes selon leur altitude et le type de nuages. **L'effet des nuages est probablement un élément déterminant dans les simulations.**

De même, les émissions de gaz à effet de serre sont accompagnées d'émissions d'aérosols, particules qui, absorbant les rayonnements du soleil, ont plutôt tendance à refroidir la planète. Mais, leur temps de résidence atmosphérique étant très court, leurs effets ne peuvent pas compenser, à l'échelle du siècle futur, l'effet radiatif des GES, même s'ils peuvent avoir des effets locaux (ils influencent notamment la formation et la durée de vie des nuages dans les zones ils sont émis, c'est à dire dans certaines régions subcontinentales).

L'ensemble de ces phénomènes, que les chercheurs ne connaissent qu'avec une grande incertitude, sont appelés effets radiatifs indirects ou encore rétroactions. Ils peuvent entraîner, selon les phénomènes, une accélération de l'augmentation de température ou au contraire un ralentissement.

Toutefois, une certitude existe : quels que soient les modèles utilisés, **la température de la planète augmente de façon plus importante si l'on prend en compte tous ces paramètres rétroactifs**, que si on les néglige. Ainsi par exemple, l'effet « direct » du doublement de CO<sub>2</sub> dans l'atmosphère conduirait à une élévation de la température de 1,2°C. **Si l'on tient compte des effets rétroactifs, cette augmentation a été évaluée, dans le dernier rapport publié en 1995 par le Giec, à une fourchette allant de 1,5 à 3,5°C**, (1,5°C à 4,5°C si l'on atteint « l'équilibre » du climat) selon les modèles, correspondant à différentes « sensibilités » du climat, et selon les différents scénarios.

Il faut noter ici, **que depuis le dernier rapport du GIEC datant de 1995, de nouveaux scénarios ont été étudiés, prenant en compte la réduction d'émissions d'aérosols, polluants nocifs**. Même s'il n'y a pas de changement dans la simulation des modèles; dans ce cas, **l'augmentation de température se situerait dans une fourchette plus large allant de 1,5 °C à 6 °C, cette dernière valeur correspondant à un scénario extrême**. L'interaction des cycles biochimiques (carbone) avec le système climatique peut en particulier conduire à une amplification de la réponse climatique.

Dans toutes les hypothèses envisagées, **la rapidité du réchauffement serait**

**probablement plus élevée qu'elle ne l'a été à toute autre période depuis 10 000 ans.**

Ce réchauffement de la planète s'accompagnera d'une **modification important des régimes de précipitations et d'une élévation du niveau moyen de la mer**, d'une valeur de l'ordre de 50 cm, avec des valeurs extrêmes de 15 et 95 cm, indiquant l'incertitude liée à cette prédiction. En particulier, les chercheurs ne connaissent pas suffisamment le cycle hydrologique dans les régions polaires et l'évolution future du Groenland et de l'Antarctique en cas de réchauffement climatique.

Enfin une augmentation de la température pourrait modifier notablement la circulation des océans. Ainsi tous les modèles présentent un ralentissement de la circulation océanique dans l'Atlantique nord, qui pourrait avoir de fortes conséquences sur le climat européen. Dans l'état actuel des connaissances, si les estimations relatives à la température moyenne de la planète et au niveau de la mer sont fiables, **la confiance est moindre dans les prédictions climatiques à l'échelle régionales et dans celles qui concernent les précipitations et le cycle hydrologique.**

### Comment fonctionnent les modèles ?

La modélisation numérique consiste à « quadriller » la planète en un maillage de l'ordre de quelques centaines de km à l'horizontale et d'un km à la verticale. A l'intérieur de ce maillage, on calcule l'évolution dans le temps de paramètres tels que le vent ou les courants, la température, la vapeur d'eau, les nuages, la salinité de l'eau océanique, etc... Ces modèles permettent de décrire avec une bonne exactitude les mouvements de l'atmosphère ou de l'océan qui sont organisés à une grande échelle. Toutefois, les mouvements de l'atmosphère qui forment les nuages sont très souvent des mouvements à petite échelle. Les nuages affectent le rayonnement solaire, dont ils réfléchissent environ 20 % de l'espace, et jouent donc un rôle important dans l'effet de serre.

C'est dans la représentation des nuages dans les modèles climatiques que les efforts se sont le plus concentrés ces dernières années. Un autre paramètre important est l'interaction avec la surface, la végétation étant l'un des vecteurs principaux permettant l'échange d'eau entre les couches superficielles au sol et l'atmosphère.

## Quelle validité pour les modèles climatiques ?

La construction des modèles climatiques repose sur des lois physiques fondamentales, simplifiés lorsqu'il s'agit de traiter des processus de petite échelle (nuages, végétation). Leur validation s'appuie sur un réseau de mesures météorologiques ou océaniques important, ainsi que sur des mesures satellitaires.

Les modèles s'appuient aussi sur une connaissance toujours plus grande du climat du passé, qui permet de comprendre les mécanismes climatiques et de « caler » les modèles.

A l'échelle géologique, les variations de concentration des GES sont parallèles à celle de la température. A l'échelle du siècle, la relation entre température et GES est plus difficile à mettre en évidence à cause de la variabilité naturelle du système climatique et de l'effet refroidissant des poussières dont la concentration est particulièrement importante dans les régions industrialisées où les mesures sont les meilleures et les plus nombreuses.

Plusieurs informations nous proviennent de l'étude de ce passé : entre le XVI et le XIXème siècle, le climat fut caractérisé par un « petit âge glaciaire », qui s'est terminé au début du XXème siècle.

**Le réchauffement de ce siècle est bien réel, et nous sortons de la zone où les fluctuations naturelles du climat peuvent encore constituer une explication au réchauffement en cours : les effets des activités humaines sur le climat pourront être plus facilement détectables.**

D'autre part, les chercheurs ont découvert, ces dernières années, l'existence de variations climatiques rapides au cours de la dernière période glaciaire (voir fiche variabilité naturelle du climat), et envisagé que de tels phénomènes se soient produits également pendant les périodes interglaciaires.

Aussi, les experts évoquent très sérieusement la possibilité de « **surprises climatiques** »,

qui pourraient générer dans le futur des fluctuations de circulations atmosphériques et océaniques rapides et de grande ampleur.

## Une meilleure connaissance et toujours plus d'incertitudes...

La nature des incertitudes associées au pouvoir prédictif des modèles climatiques est désormais bien comprise, mais les moyens de la réduire sont limités. La connaissance du climat récent, d'un intérêt scientifique considérable, est difficile à interpréter compte tenu de la quantité de processus concurrents : aérosols anthropiques (liés à l'activité humaine) ou volcaniques, variations du rayonnement solaire, fluctuations naturelles. Les informations satellitaires, donnant des indications sur les effets rétroactifs des nuages et de la vapeur d'eau à l'échelle du cycle saisonnier ou à l'échelle interannuelle, seront très importantes.

Le rôle de la modélisation ces dernières années a été de fournir un cadre aussi rigoureux et contraignant que possible pour explorer les futurs de la planète. En prenant en compte un nombre de facteurs de plus en plus important (intégrant de plus en plus les interactions entre l'atmosphère, les océans et la biosphère), **le niveau de certitude quant à l'éventualité d'un changement climatique a augmenté.** Mais devant la complexité des processus en jeu, la capacité des modélisateurs à prédire de manière détaillée cette évolution est apparue de plus en plus aléatoire. **On a pu élargir la gamme des futurs possibles, et de ce point de vue, l'incertitude qui entoure la prédiction des modèles reflète de moins en moins l'ignorance des scientifiques et de plus en plus la complexité d'un monde réel qui n'est pas entièrement prévisible.**

**De fait, il faut appeler ces incertitudes des risques.**

Plus que l'amplitude des changements à venir, **c'est la rapidité avec laquelle ils peuvent survenir qui pose le problème important.**

## Le cycle du carbone : comment mieux connaître les échanges de CO<sub>2</sub> à la surface de la terre?

Dans le protocole de Kyoto, plusieurs dispositions prévoient des alternatives à la réduction « pure et dure » des émissions : achat de permis d'émettre à d'autres Etats, mise en place de projets de développement propre dans les pays en voie de développement, stockage du carbone dans la végétation.

**Le principe** de constitution de ces « puits de carbone biosphériques » **consiste à augmenter volontairement le contenu en carbone des écosystèmes terrestres pour créer des stocks qui seront déduits des émissions fossiles** lors de la période de vérification du respect des engagements du protocole de Kyoto, entre 2010 et 2012.

### Les puits biosphériques

Depuis 1957, la mesure très précise du taux de croissance moyen du CO<sub>2</sub> dans l'air montre que **seulement la moitié des émissions fossiles s'accumule dans l'atmosphère. L'autre moitié est donc réabsorbée par l'océan et la végétation.** Les modèles numériques du cycle du carbone océanique, des codes complexes qui simulent la circulation des océans, la chimie du carbone dans l'eau de mer, et parfois l'activité biologique marine, suggèrent que les océans absorbent environ 2 Pg (petagrammes : 10<sup>15</sup> g) de carbone par an. Ces calculs sont maintenant confirmés par de nouvelles données océanographiques. L'océan est un stockage durable pour le carbone fossile : tout excès de CO<sub>2</sub> qui s'y dissout est entraîné depuis la surface vers les eaux profondes et les modèles océaniques prédisent qu'il y sera immobilisé pendant plusieurs siècles, le temps d'avoir brûlé dans l'atmosphère l'ensemble des réserves de carbone fossile, estimées à environ 10 000 Pg.

Les mesures de la concentration atmosphérique du CO<sub>2</sub> sur un réseau d'observatoires qui compte actuellement 80 stations dans le monde, montrent des teneurs en CO<sub>2</sub> légèrement plus élevées dans l'hémisphère nord que dans l'hémisphère sud. Cette différence inter-hémisphérique de 3 ppm est faible comparée à l'abondance globale du

CO<sub>2</sub> qui est d'environ 365 ppm. Elle reflète pourtant une asymétrie dans la distribution des flux de CO<sub>2</sub> de chaque hémisphère. Cette asymétrie ne peut s'expliquer par la carte des émissions de CO<sub>2</sub> fossile sans y ajouter un puits de carbone dans l'hémisphère nord. L'analyse de la composition isotopique du CO<sub>2</sub> atmosphérique qui est sensible à la fixation de carbone par la végétation, mais pas à la dissolution du CO<sub>2</sub> dans l'océan, suggère qu'une partie du puits de l'hémisphère nord est située sur les continents.

Cependant, **si les scientifiques s'accordent sur l'existence d'un puits biosphérique au nord de l'équateur, la répartition de ce puits en longitude - entre l'Amérique du Nord, les océans Pacifique et Atlantique Nord, et l'Eurasie - reste mal élucidée.**

### Le mécanisme de création des puits : étude de la fixation du CO<sub>2</sub> par les plantes

Du carbone est incorporé dans les tissus des plantes par la photosynthèse, tandis que du CO<sub>2</sub> est émis par les plantes et les sols par plusieurs processus d'oxydation. Les végétaux, les microbes et la faune du sol oxydent la matière organique et respirent du CO<sub>2</sub> dans l'atmosphère. Sporadiquement, les incendies, les tempêtes, les maladies ou l'attaque d'insectes détruisent la végétation et parfois la couche de carbone organique du sol et rejettent alors du CO<sub>2</sub>. Outre ces cycles naturels de respiration et de combustion, les hommes utilisent les ressources des écosystèmes et prélèvent une fraction de la biomasse produite annuellement qui correspond aux aliments, aux fibres et aux produits du bois. Le carbone que contient la biomasse récoltée va soit être oxydé et rejeté dans l'atmosphère en 1 ou 2 ans, (aliments, papier), soit se décomposer plus lentement (meubles, matériaux de construction...).

En outre, la pression anthropique sur les écosystèmes est très importante. D'une part, les terres cultivées forment 10% environ de la surface des continents, c'est à dire 15 % de la superficie qui n'est pas couverte de glace ou

de déserts. Ces zones de culture contribuent pour 10% environ à la production de biomasse

du globe, soit 4 Pg par an contre 50 Pg par an pour les autres biotopes.

D'autre part, parmi les biotopes dits "naturels", il en existe peu qui ne soient pas influencés directement par l'action des hommes. La plupart des forêts d'Europe, d'Amérique du Nord et une partie des forêts Sibériennes sont exploitées pour le bois. En France, environ 80% des forêts sont gérées et la récolte annuelle du bois correspond à 10 Millions de tonnes de carbone (10 MtC par an).

**Les puits biosphériques résultent d'un déséquilibre entre le flux de carbone entrant (photosynthèse) et le flux sortant (respiration et combustion).** Photosynthèse et respiration sont des flux de l'ordre de 60 Pg par an, tandis que les puits biosphériques n'excèdent pas 1 à 2 Pg par an. Avant l'ère industrielle, la photosynthèse et l'oxydation du carbone étaient compensées pour chaque biotope, et sur le globe. Par voie de conséquence, la teneur en CO<sub>2</sub> de l'atmosphère était remarquablement stable, comme en témoignent les archives du CO<sub>2</sub> des carottes de glace qui indiquent des variations lentes n'excédant pas 20 ppm au cours des 10 000 dernières années.

Si les puits biosphériques à l'échelle globale traduisent un excès de photosynthèse par rapport à la respiration, leurs causes sont incertaines et mal connues. L'effet fertilisant de l'augmentation du CO<sub>2</sub> sur la croissance des plantes, l'apport d'azote sur les forêts par le dépôt des polluants azotés émis par combustion dans les moteurs et par l'utilisation des engrais, la repousse des forêts suite à l'abandon de terres agricoles, l'effet de la variabilité climatique sur les dernières décennies sont couramment cités comme les principaux facteurs de l'absorption du carbone sur les continents. Il existe des modèles numériques du fonctionnement biogéochimique de la biosphère continentale qui prennent en compte l'ensemble de ces processus d'une manière simplifiée et sont en général calibrés sur des études in vitro des effets d'enrichissement du CO<sub>2</sub> ou de dépôt d'azote sur les plantes.

Enfin, à l'échelle du globe, **les échanges de CO<sub>2</sub> varient beaucoup d'une année sur l'autre, comme le montrent les fluctuations inter annuelles du taux de croissance du CO<sub>2</sub> dans l'atmosphère.** Les mesures de la pression partielle du CO<sub>2</sub> dissous dans les eaux de surface, et les simulations globales des modèles de carbone océanique suggèrent

que les échanges de CO<sub>2</sub> entre l'océan et l'atmosphère varient relativement peu d'une année sur l'autre, ce qui suggère par conséquent que le bilan de carbone des

continents fluctue fortement. Les changements de physiologie des écosystèmes terrestres semblent être la cause principale de la dynamique interannuelle des échanges biosphère-atmosphère. Notamment, l'occurrence du phénomène El Niño dans les tropiques génère des sécheresses en Amazonie et en Asie du Sud-Est qui ont un impact sur les flux de carbone.

**Aux petites échelles, les scientifiques recherchent aussi des preuves de l'absorption du carbone par les plantes.** Des techniques micro météorologiques permettent depuis quelques années de mesurer en continu les échanges turbulents de CO<sub>2</sub> entre la végétation et l'atmosphère. L'étude récente d'un échantillon de 20 forêts en Europe montre que la plupart des parcelles étudiées absorbent actuellement du carbone, principalement aux moyennes latitudes entre 40 et 50°N, avec des taux d'absorption du carbone allant jusqu'à 6 tC par km<sup>2</sup> par habitant et par an. Les mesures de flux ne représentent que quelques kilomètres carrés et concernent pour l'essentiel des forêts jeunes qui sont en phase de croissance. Bien qu'elles ne soient pas extrapolables simplement pour déduire les puits de carbone à l'échelle d'un biotope ou pour établir le bilan de carbone d'un Etat, les mesures de flux apportent un éclairage nouveau sur les processus d'échange du carbone entre la biosphère et l'atmosphère, en particulier sur le rôle de la respiration.

## Quel futur pour les puits ?

**Faut-il diaboliser les puits biosphériques, ou peut-on croire que les forêts replantées sont la solution pour en finir avec l'effet de serre ?**

Stocker du carbone dans les forêts est une opération réversible, en raison du temps de résidence associé au cycle du carbone dans la végétation et les sols. A l'inverse, la combustion du CO<sub>2</sub> fossile injecte dans le système atmosphère, océan et biosphère du carbone qui était enfoui dans l'écorce terrestre depuis des millions d'années. Il s'agit d'un processus irréversible d'augmentation du CO<sub>2</sub> dans l'atmosphère. A la fin de l'ère industrielle, une quantité équivalente à environ 15% des réserves fossiles qui auront été consommées restera piégée dans l'atmosphère pour

plusieurs millénaires. Seule la formation de calcite au fond des océans fera alors très lentement baisser la teneur en CO<sub>2</sub> de l'atmosphère de la Terre.

En-deçà de ces échelles de temps géologiques, **ce qui importe pour nos descendants et pour nous mêmes dans la lutte contre l'effet de serre est en fait de limiter la croissance du CO<sub>2</sub> au cours du siècle prochain.** L'humanité continuera de puiser dans les réserves fossiles, faisant augmenter la teneur en CO<sub>2</sub> dans l'air.

**Stocker du carbone dans la biosphère peut dès lors permettre de gagner du temps en freinant la croissance du CO<sub>2</sub> futur, avant que de nouvelles technologies dites "propres" ne prennent le relais pour réduire durablement les émissions.**

Les puits de carbone que le protocole de Kyoto propose de créer correspondent surtout à des projets de reboisement.

Un rapport spécial a été commandé aux experts du Groupe International d'Etude du Changement Climatique (Giec, en anglais IPCC), qui souligne l'importance des définitions d'une forêt, des modes de comptabilité, en particulier pour les changements du carbone dans le sol, et de l'impact des puits de carbone sur le développement durable futur des pays en voie de développement.

Les auteurs du rapport ont produit une synthèse des connaissances existantes pour estimer quelle pourrait être la fourchette des puits biosphériques dans le protocole de Kyoto.

Selon les calculs du Giec, la quantité de carbone que l'on pourrait stocker dans la végétation conformément au protocole de Kyoto est estimée entre 0 et 0,5 Pg en 2010. Ce chiffre représente 10% du total des émissions de CO<sub>2</sub> fossile par les Etats signataires. L'apport des puits biosphériques pour limiter la croissance du CO<sub>2</sub> dans l'atmosphère semble donc modeste par rapport aux 2 Pg de carbone qu'absorbe naturellement la biosphère chaque année, ou encore par rapport aux 2 Pg de carbone émis dans l'atmosphère par la déforestation.

En revanche, **la taille des puits biosphériques est énorme si on la rapporte aux objectifs de réduction des émissions.**

Les puits biosphériques représentent à eux seuls une absorption de carbone équivalente aux objectifs de réduction des émissions. Si leur coût s'avère compétitif, nous pourrions assister à une augmentation mondiale de reboisement pour contrer l'effet de serre.



## LSCE, LMD et IPSL

**Le laboratoire des Sciences du Climat et l'Environnement (LSCE)** est une unité mixte de recherche CEA-CNRS créée en janvier 1998 par la fusion du Centre des Faibles Radioactivités et du Laboratoire de Modélisation du Climat et de l'Environnement. Le LSCE est implanté sur deux sites : le campus CNRS de Gif sur Yvette et le site CEA/Saclay de l'Orme des Merisiers.

Son thème de recherche principal est centré sur l'étude de la variabilité des mécanismes contrôlant l'environnement global et le climat.

Les thèmes de recherche du LSCE sont répartis sur trois grands axes :

- Les sciences du climat, dont l'objectif est de comprendre les mécanismes de la variabilité naturelle du climat à différentes échelles de temps.
- L'étude des cycles biogéochimiques, afin de comprendre les processus intervenant dans le cycle de composants clés qui interagissent avec le climat, comme le cycle du carbone ou celui des aérosols.
- La géochronologie et l'analyse de géomarqueurs, basées sur la maîtrise d'une palette de techniques appliquées à l'étude passée et présente de la géosphère et de ses relations avec le climat.

Fondé en 1968, le **laboratoire de Météorologie Dynamique (LMD)** du Centre National de la Recherche Scientifique (CNRS) comprend environ 150 membres répartis sur trois sites : l'École Polytechnique, l'École Normale Supérieure et l'Université Pierre et Marie Curie. Le laboratoire a pour objet la recherche sur les mécanismes, l'évolution et la prévision des phénomènes météorologiques et du climat.

Les recherches du LMD portent sur quatre catégories d'activités :

- La modélisation du climat et des processus climatiques notamment.
- L'analyse de mesures effectuées à partir de systèmes spatiaux, comme la mesure du Bilan radiatif Terrestre ou l'analyse du rayonnement atmosphérique.

- Des activités expérimentales comprenant la mise au point d'instruments de mesure tels la radiométrie satellitale ou la télédétection par Lidar.
- Des activités théoriques axées sur la dynamique des fluides géophysiques, la non-linéarité et la turbulence ou encore l'assimilation des données.

Ces deux laboratoires sont réunis au sein de **l'Institut Pierre Simon Laplace (IPSL)**, créé par le CNRS au 1er Janvier 1994. L'IPSL est une fédération de laboratoires de la région parisienne travaillant sur le climat. L'Institut remplit une triple mission de recherche, d'enseignement et de service d'observation. Il fonde son activité, d'une part sur les orientations scientifiques propres des unités de recherche qui le composent, d'autre part sur la mise en œuvre au niveau fédératif de services scientifiques communs. Ceux-ci permettent une rationalisation des moyens et une meilleure efficacité dans la conduite des activités de recherche, en favorisant notamment les collaborations entre les équipes de recherche des différentes unités.

Outre le LSCE et le LMD, l'IPSL regroupe le CETP, le LPCM, le LODYC et le SA (1). Les recherches conduites au sein de l'IPSL concernent principalement l'étude des différentes composantes de l'environnement terrestre (océan-atmosphère-biosphère-cryosphère-surfaces continentales), de l'échelle locale à l'échelle globale, l'évolution passée et future de la planète Terre, l'étude de l'environnement ionisé de la Terre et celle des environnements planétaires. Les actions fédératrices mises en œuvre par l'IPSL sont ainsi de deux types :

- L'effort du Pôle de Modélisation de l'IPSL a été de préparer et de mettre en place le couplage des modèles individuels conçus dans les différents laboratoires. Ce travail a d'abord donné lieu à la mise au point d'un modèle couplé océan/glace de

mer/atmosphère qui a été intégré pour des simulations de plusieurs siècles dans des conditions climatiques variées.

- Des projets scientifiques pour lesquels l'émergence au niveau de l'IPSL conduit à une meilleure efficacité. Ceux-ci peuvent aussi bien concerner les développements expérimentaux (plate-forme aéroportée

lidar-radar RALI pour l'étude des nuages), que les campagnes coordonnées de recherche (programme ESQUIF d'étude de la pollution en région francilienne) ou la mise en œuvre de projets spatiaux (mission PICASSO-CENA d'étude des nuages et des aérosols soutenue par le CNES et la NASA).

(1)

CETP : Centre d'études des environnements terrestres et planétaires

LPCM : Laboratoire de physique et chimie marines

LODYC : Laboratoire d'océanographie dynamique et de climatologie

SA : Service d'aéronomie

Sites web :

IPSL et les laboratoires affiliés : [www.ipsl.jussieu.fr](http://www.ipsl.jussieu.fr)

LSCE : [www-lsce.cea.fr](http://www-lsce.cea.fr)

LMD : [www.lmd.jussieu.fr](http://www.lmd.jussieu.fr)

## Quelques repères chronologiques

- 1979 **Première conférence mondiale sur le climat à Genève** : lancement d'un programme de recherche, le Programme des Nations Unies pour l'environnement.
- 1988 Création conjointement par l'Organisation météorologique mondiale et par le Programme des Nations Unies pour le Développement, du **groupe intergouvernemental d'experts sur l'évolution du climat (Giec)**. Sa mission est d'évaluer l'information scientifique sur les changements climatiques, leurs impacts et les mesures de prévention et d'adaptation envisageables.
- 1989 **2<sup>ème</sup> conférence mondiale sur le climat (La Haye)**. La Communauté européenne s'engage pour l'an 2000 à stabiliser ses émissions de CO<sub>2</sub> au niveau de 1990. La déclaration finale préconise l'instauration d'une convention internationale sur les changements climatiques.
- 1990 Création d'un Comité intergouvernemental de négociations chargé d'élaborer une convention-cadre des Nations-Unies; création du Fonds pour l'environnement mondial, mécanisme financier qui a pour objet d'aider les pays en développement à s'attaquer à 4 grands problèmes d'environnement, dont le réchauffement climatique et l'appauvrissement de la couche d'ozone.
- 1992 Signature, en juin, à Rio, de la **Convention-cadre sur les changements climatiques**, lors du Sommet de la terre. Entrée en vigueur en mars 1994, son objectif est la stabilisation des concentrations de gaz à effet de serre dans l'atmosphère. Les pays développés, l'Union européenne et les pays en transition (Annexe I) s'engagent à stabiliser leurs émissions d'ici à l'an 2000 au niveau des émissions de 1990.
- 1995 Mandat de Berlin : en mars, la première conférence des Parties (COP 1) à la Convention reconnaît la nécessité d'un renforcement des engagements des pays développés. En décembre, le second rapport du Giec confirme la responsabilité humaine dans le changement climatique.
- 1997 **Signature du Protocole de Kyoto lors de la troisième session de la COP (COP 3)** qui fixe des objectifs chiffrés, juridiquement contraignants, de réduction de 5,2 % par rapport à 1990 des émissions des pays développés en 2008-2012.
- 1998 Le **Plan d'action de Buenos-Aires** (COP 4) met en place un calendrier de travail qui doit aboutir à la conférence de novembre 2000 à La Haye (COP 6).
- 1999 COP 5 à Berlin : négociations sur le thème du Plan d'action de Buenos Aires.
- 2000 Conférence préparatoire de Lyon, en septembre, et COP 6, à La Haye, du 13 au 24 novembre.

*A venir*

- Novembre 2000 **COP 6 à La Haye, du 13 au 24**, au cours de laquelle doivent être finalisées les modalités d'application du Protocole de Kyoto.
- Décembre 2000 Début du Mécanisme de Développement Propre.
- 2001 Troisième rapport du Giec.
- 2002 **Entrée en vigueur du Protocole s'il a été ratifié par 55 pays représentant au moins 55 % des émissions de CO<sub>2</sub> du monde développé.**
- 2005 Preuve des progrès des Parties dans l'exécution de leurs engagements
- 2008 Début de la première période d'engagement au titre du Protocole de Kyoto (2008-2012); début des échanges de droits d'émissions; début de l'application conjointe

## Quelques chiffres...

### Emissions de CO<sub>2</sub>

Emission de CO <sub>2</sub> d'origine énergétique /hbt dans le monde en 1997 (en t./hbt)	
Chine	2,6
Mexique	3,7
France	6,2
Italie	7,4
Ex-Urss	7,8
Europe des 15	8,2
Japon	9,3
Royaume-Uni	9,4
Allemagne	10,8
Canada	15,8
Australie	16,5
Etats-Unis	20,5

Source : OCDE

Emission de CO <sub>2</sub> en grammes par kWh produit par les pays de l'Union européenne	
France	72
Europe des 15	380
Allemagne	616
Danemark	819

### Apport énergétique de quelques gaz à effet de serre :

CO <sub>2</sub>	1,56 W/m <sup>2</sup>
CH <sub>4</sub>	0,5 W/m <sup>2</sup>
N <sub>2</sub> O	0,1 W/m <sup>2</sup>
CFC	0,3 W/m <sup>2</sup>

## Part relative des différents secteurs dans les émissions de gaz à effet de serre en France

Secteurs	Part (en %) dans les émissions	Dont CO <sub>2</sub> ( en %)
Industrie	23	76
Transports	22	92
Agriculture et Forêts	18	56
Bâtiments	12,5	96
Production d'énergie	8	87
Déchets	3	61
Gaz frigorigènes	0,28	

Source : Mission interministérielle de l'effet de serre

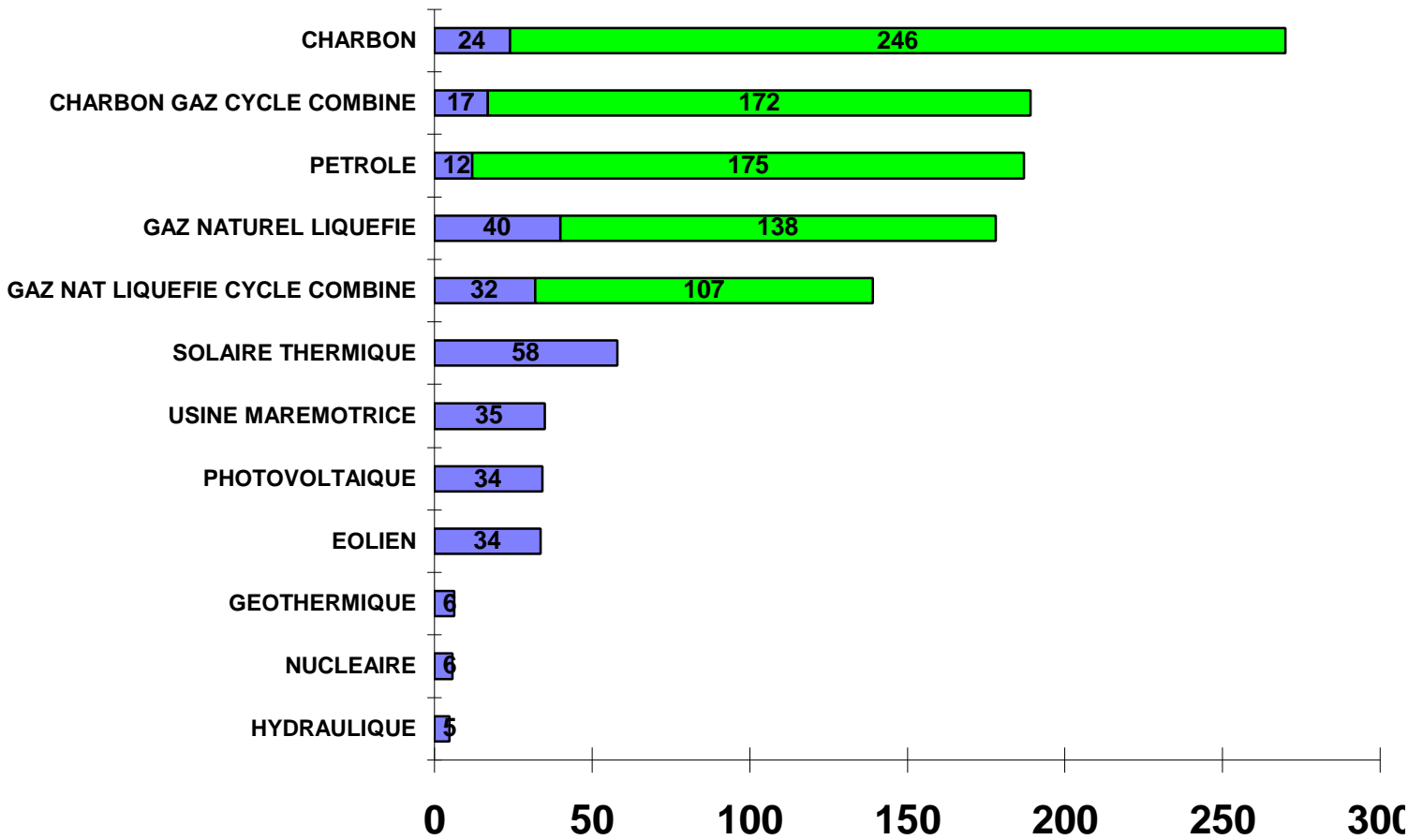
## Rejet en CO<sub>2</sub>

Comparaison pour une quantité donnée d'électricité :

Gaz	450g - 650g
Charbon	900g - 1200g
Pétrole	700g - 800g
Nucléaire	40g

*Combustibles fossiles : plus il y a d'hydrogène, moins il y a d'émission de CO<sub>2</sub>*

Facteurs d'émission en équivalent CO2 de la chaîne énergétique complète des moyens de production d'électricité



Source : AIEA

g de carbone /kWh

## Part relative des différents secteurs dans les émissions de gaz à effet de serre en France

Secteurs	Part (en %) dans les émissions	Dont CO <sub>2</sub> ( en %)
Industrie	23	76
Transports	22	92
Agriculture et Forêts	18	56
Bâtiments	12,5	96
Production d'énergie	8	87
Déchets	3	61
Gaz frigorigènes	0,28	

Source : Mission interministérielle de l'effet de serre

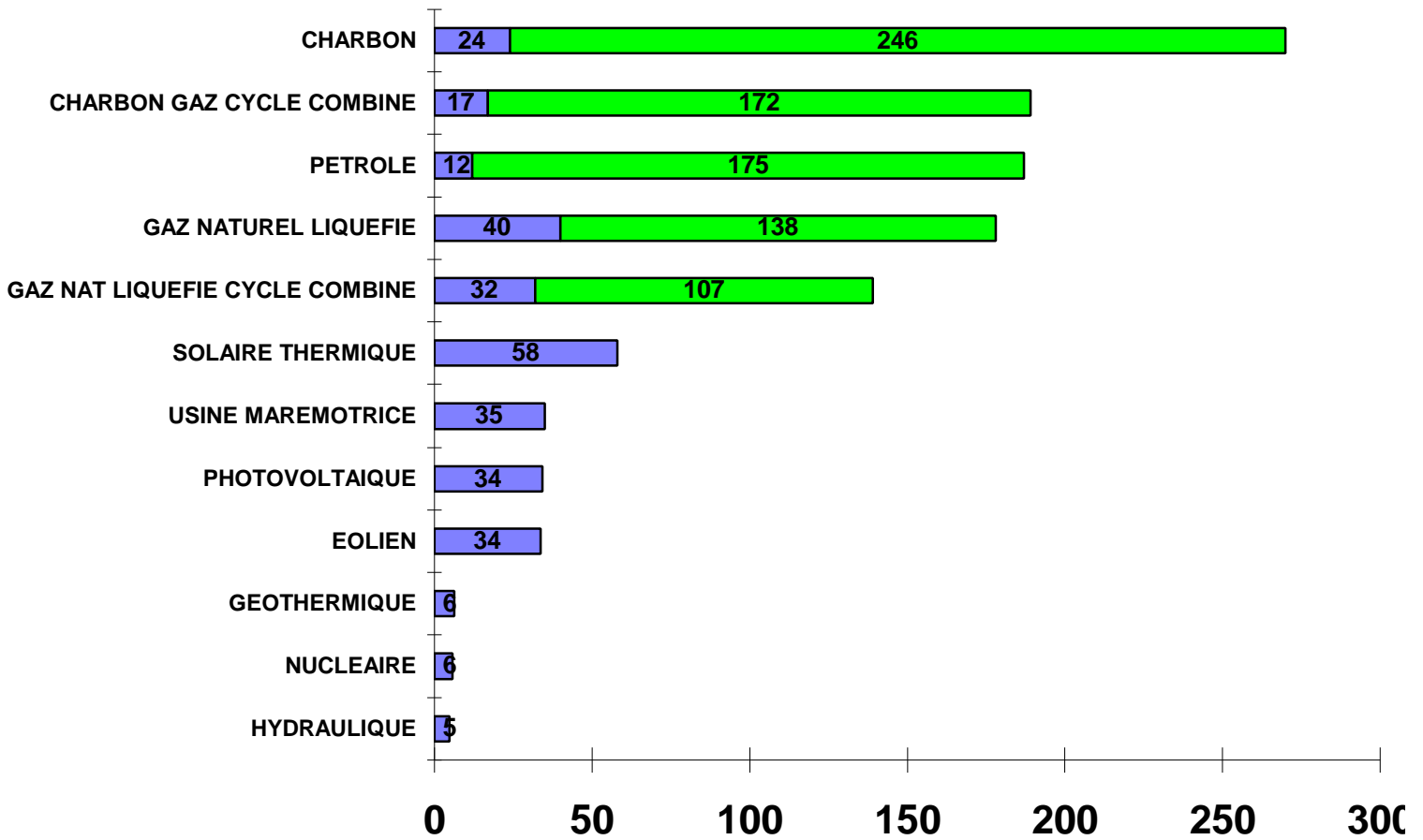
## Rejet en CO<sub>2</sub>

Comparaison pour une quantité donnée d'électricité :

Gaz	450g - 650g
Charbon	900g - 1200g
Pétrole	700g - 800g
Nucléaire	40g

*Combustibles fossiles : plus il y a d'hydrogène, moins il y a d'émission de CO<sub>2</sub>*

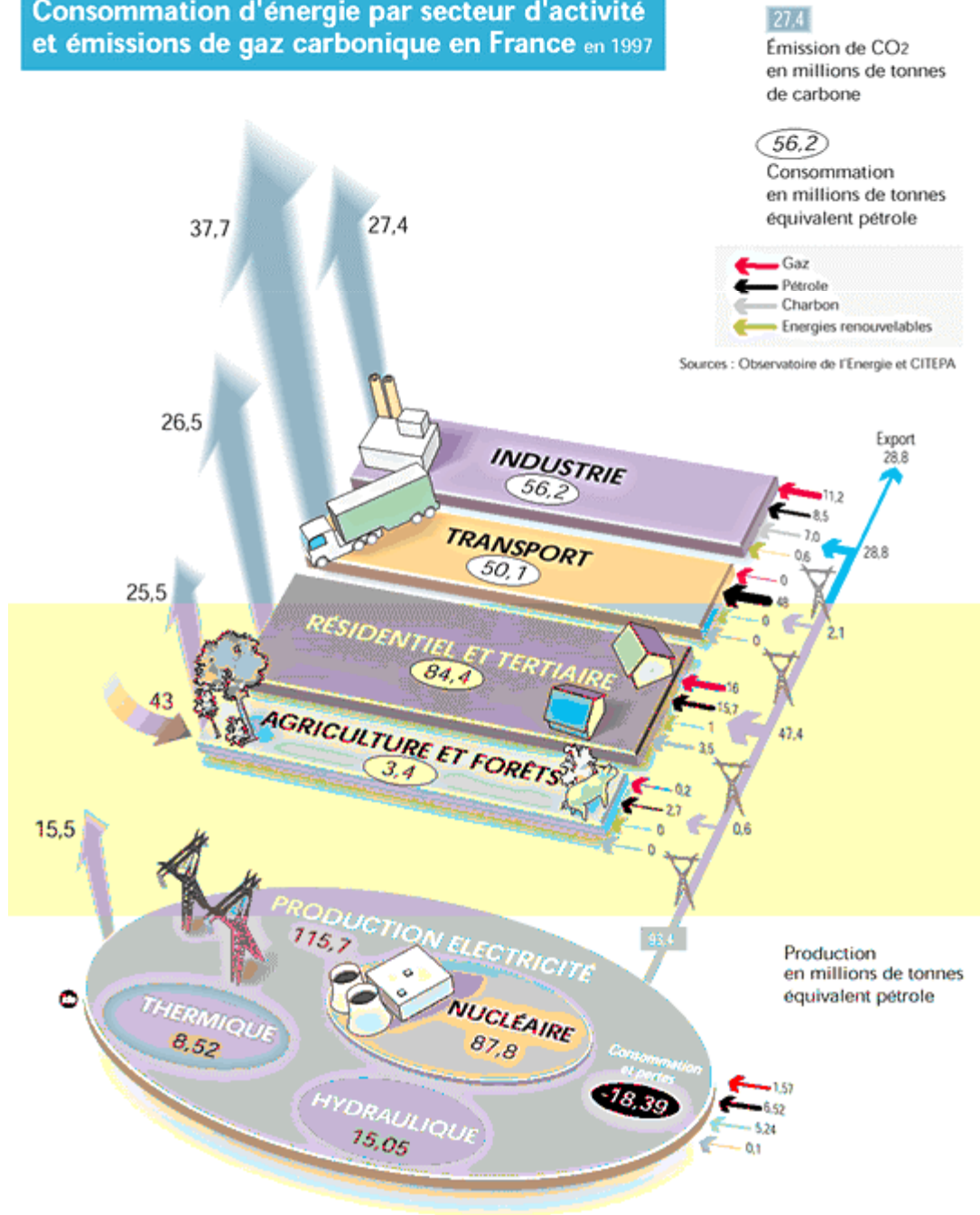
Facteurs d'émission en équivalent CO2 de la chaîne énergétique complète des moyens de production d'électricité



Source : AIEA

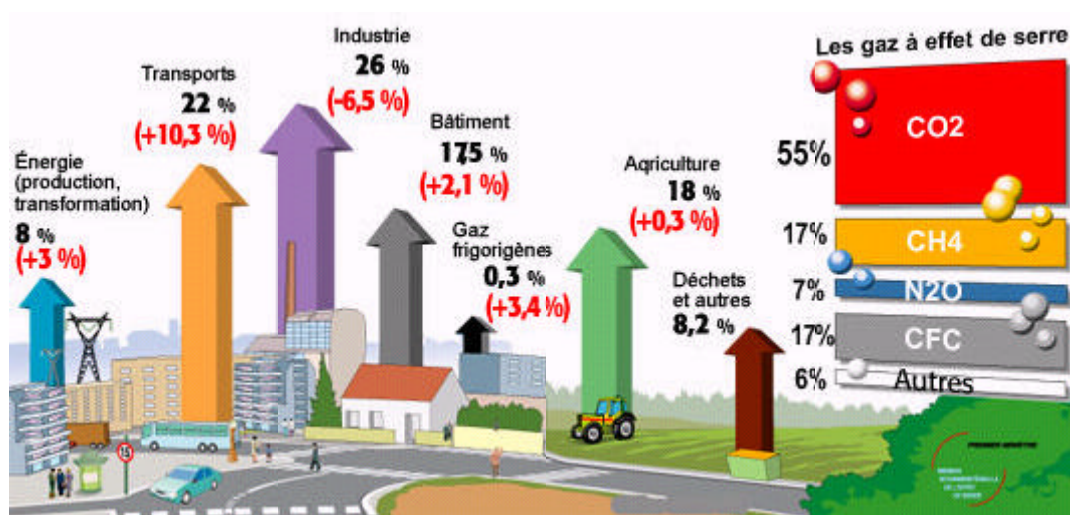
g de carbone /kWh

## Consommation d'énergie par secteur d'activité et émissions de gaz carbonique en France en 1997



Source : Mission interministérielle de l'effet de serre

La part relative des activités dans les émissions de GES en France et leur croissance à l'horizon 2010 en l'absence de mesures nouvelles. Chiffres CITEPA 1997.



**CO<sub>2</sub>** = Dioxyde de carbone  
**CH<sub>4</sub>** = Méthane  
**N<sub>2</sub>O** = Protoxyde d'azote  
**CFC** = Chlorofluocarbone

Source : Mission interministérielle de l'effet de serre.



## Glossaire

**Aérosols** : suspension, dans un milieu gazeux, de particules solides ou liquides présentant une vitesse de chute négligeable. D'origine naturelle (érosion, éruption volcanique...), ou humaine (activité industrielle, feux...), les aérosols atmosphériques jouent un rôle clé dans le fonctionnement du système terrestre en absorbant ou diffusant une partie des rayonnements solaire et tellurique ou en intervenant dans la formation des nuages, leur durée de vie et leurs propriétés optiques

**Bilan radiatif** : Différence entre le rayonnement solaire incident ou flux solaire absorbé par la surface terrestre et le rayonnement infrarouge qu'elle réémet. Ce bilan varie avec la latitude, il est positif dans la zone intertropicale et négatif dans les régions polaires.

**Biosphère** : ensemble des êtres vivants, animaux et végétaux, vivant à la surface de la Terre.

**Chlorofluorocarbures (CFC)** : gaz chlorofluorocarbonés contenus dans certains composés anthropiques (par exemple les propulseurs d'aérosols) et mis en cause dans le processus de destruction de la couche d'ozone. Très stables et peu denses, ils finissent par monter dans la stratosphère où les rayons ultraviolets les dissocient en libérant des radicaux chlore qui jouent le rôle de catalyseurs dans la destruction de l'ozone.

**Ozone** : gaz de formule O<sub>3</sub>, se formant dans la haute stratosphère par action des rayons ultraviolets sur le dioxygène. Il filtre en partie le rayonnement ultraviolet du Soleil, participant à l'équilibre écologique de la planète.

**Rejets anthropiques** : rejets résultant de l'activité humaine.

**Stratosphère** : couche de l'atmosphère comprise entre la troposphère (6 à 17 km d'altitude) et la mésosphère (50 km d'altitude).

**Troposphère** : basse couche de l'atmosphère comprise entre le sol et la stratosphère.

1 ppm = une partie par million

1 Pg = un Petagramme = 10<sup>15</sup> g (unité de poids)

1 Tg = un Teragramme = 10<sup>12</sup> g (unité de poids)

**Sources** : Dictionnaire des sciences de la vie et de la Terre (M. Breuil, Nathan, 1997) ; le dictionnaire des sciences (dir. L. Salem, Hachette, 1990) ; INSU, 30 ans de recherches en sciences de l'Univers, 1967-1997 (CNRS/INSU)