

La production d'énergie et la concentration atmosphérique des gaz responsables de l'effet de serre

Il faut restructurer les systèmes énergétiques pour réduire les émissions d'anhydride carbonique

par E. Iansiti et F. Niehaus

Notre planète reçoit l'énergie du rayonnement solaire et la température à sa surface résulte de l'équilibre qui s'établit entre cette énergie et celle qu'elle rayonne en retour dans l'espace. Sans l'effet de serre que produit l'atmosphère, l'équilibre s'établirait à une température moyenne de surface de -19°C , mais les gaz dits à effet de serre, tels la vapeur d'eau et les nuages, l'anhydride carbonique (CO_2), le méthane (CH_4), l'hémioxyde d'azote (N_2O), l'ozone (O_3) et les chlorofluorocarbures (CFC), et d'autres gaz de moindre importance présents à l'état de traces, captent le rayonnement infrarouge de la surface terrestre. Le phénomène est assez analogue à ce qui se passe dans une serre dont les vitrages laissent entrer le rayonnement solaire mais retiennent une grande partie du rayonnement infrarouge vers l'extérieur, d'où l'élévation de température à l'intérieur de la serre. Telle est l'origine de l'expression que l'on utilise pour désigner le phénomène qui maintient la température superficielle de la planète à 16°C , condition qui a permis à la vie de se développer.

Echauffement de l'atmosphère terrestre: l'«effet de serre»

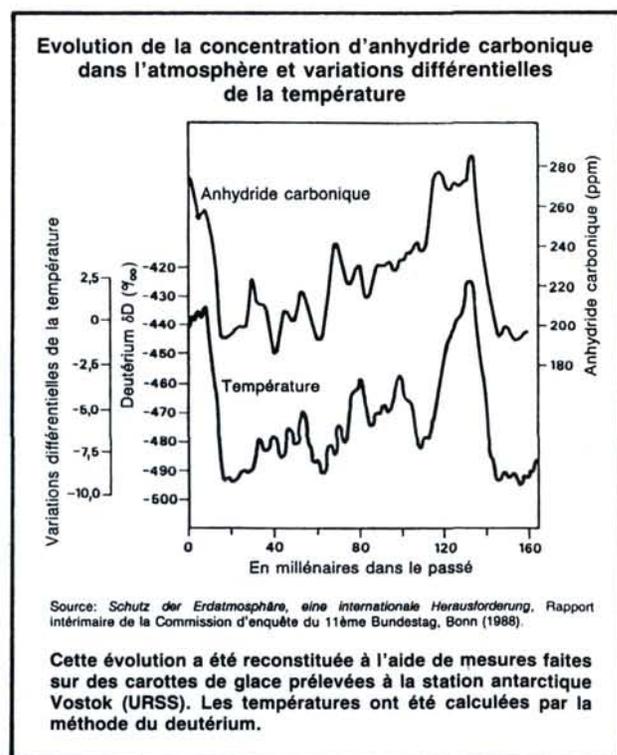
Depuis la révolution industrielle, la concentration des gaz à effet de serre n'a cessé d'augmenter. L'opinion se répand actuellement, non sans raison, qu'il en résultera un accroissement de la quantité de chaleur prisonnière de l'atmosphère et, par conséquent, une évolution du climat à l'échelle mondiale qui se manifestera très probablement par un déplacement des zones climatiques et une élévation du niveau des mers*. On peut aussi prévoir une modification de la distribution des précipitations et une accentuation des conditions météorologiques extrêmes. La vie dans maintes régions, et plus spécialement la production mondiale de denrées alimentaires, pourrait s'en ressentir.

M. Niehaus est chef de la Section de l'évaluation des risques, Division de la sûreté nucléaire de l'AIEA, et M. Iansiti travaille pour cette division en qualité d'expert.

* *The Greenhouse Effect, Climatic Change, and Ecosystems*, (SCOPE 29), publié par le Comité scientifique sur les problèmes de l'environnement du Conseil international des unions scientifiques, en collaboration avec le Programme des Nations Unies pour l'environnement et l'Organisation météorologique mondiale (mai 1988).

Pour le moment, nous avons des connaissances très imparfaites sur les sources et les modes d'élimination qui contribuent au bilan des gaz à effet de serre, en ce qui concerne moins le CO_2 et les CFC que l'hémioxyde d'azote, l'ozone et le méthane. De plus, l'échauffement de l'atmosphère dû à l'accroissement des concentrations de ces gaz est partiellement dissimulé par les variations climatiques dues à diverses causes naturelles dont la plupart ne nous sont pas encore quantitativement connues (voir la figure)*. De même, nous ignorons encore quel rôle jouent certains facteurs éventuellement réducteurs ou amplificateurs de l'effet de serre, notamment la couverture nuageuse, les rejets toujours plus abondants d'effluents gazeux par l'industrie, et les

* *Schutz der Erdatmosphäre, eine internationale Herausforderung*, Rapport intérimaire de la Commission d'enquête du onzième Bundestag, Bonn (1988).



processus océaniques. Ces incertitudes ne facilitent certes pas l'élaboration d'une politique de réduction des émissions. Elles donneraient même à penser qu'il vaudrait mieux ne rien décider avant d'élucider les effets de ces phénomènes et d'avoir confirmation de la validité des modèles analytiques. Malheureusement, le séjour des gaz à effet de serre dans l'atmosphère est de très longue durée et leur concentration ne fera que croître si l'on n'adopte pas des mesures draconiennes pour réduire leur émission. Par ailleurs, les processus océaniques et autres mécanismes réflexes sont des facteurs d'inertie qui peuvent retarder jusqu'à 100 ans les changements effectifs de température et autres variations climatiques dues aux rejets de gaz à effet de serre. Les changements amorcés aujourd'hui sont donc de toute évidence irréversibles. Aussi peut-on dire que l'évolution du climat est en quelque sorte prédéterminée par les quantités déjà rejetées dans l'atmosphère.

C'est pourquoi il a déjà été maintes fois recommandé, à l'occasion de réunions internationales, d'agir dès que possible dans le cadre des programmes nationaux pour réduire les émissions.

La production d'énergie, en particulier l'emploi des combustibles fossiles, est responsable d'une grande partie des rejets industriels de gaz à effet de serre. De là le débat sur la possibilité de limiter ces rejets en faisant appel à l'énergie nucléaire. Chaque année, les combustibles fossiles dégagent quelque 20 milliards de tonnes d'anhydride carbonique, alors qu'une centrale nucléaire ne rejette ni CO₂ ni autres gaz à effet de serre; un réacteur de 1000 mégawatts épargne ainsi à l'atmosphère les quelques six millions de tonnes de CO₂ que rejette annuellement une centrale au charbon de même puissance. Autrement dit, l'ensemble des centrales nucléaires actuellement exploitées dans le monde réduisent ces émissions d'environ 1,6 milliard de tonnes par an.

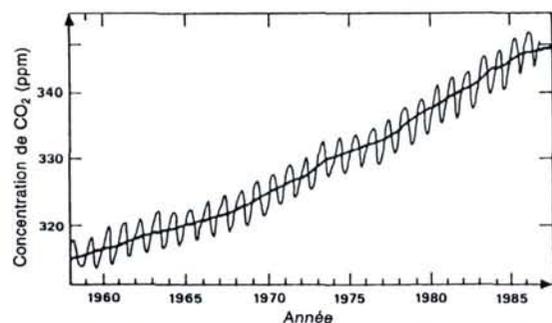
Les principaux gaz à effet de serre

Ces gaz se classent en deux groupes. Le premier comprend le CO₂, le méthane, l'hémioxyde d'azote, le CFC 11 et le CFC 12, qui ont la propriété d'absorber la chaleur rayonnée par la planète et de la lui renvoyer (l'ozone absorbe aussi directement le rayonnement solaire, y compris l'infrarouge). Les gaz du second groupe tels le monoxyde d'azote, l'oxyde de carbone et le radical hydroxyle sont chimiquement interactifs avec ceux du premier groupe, dont ils modifient les concentrations.

Passons maintenant brièvement en revue les principaux gaz responsables de plus de 95% de l'échauffement de l'atmosphère terrestre. Il faut d'abord distinguer entre les cycles naturels de ces gaz, à l'équilibre, et les émissions d'origine humaine qui, même relativement en petites quantités, peuvent perturber cet équilibre.

Anhydride carbonique. La concentration de CO₂ dans la troposphère atteint désormais une moyenne annuelle de 350 ppmv (parties par million en volume). Dans l'hémisphère Nord, on constate une variation cyclique annuelle qui peut atteindre 15 ppmv (voir la figure). Elle est essentiellement due aux fluctuations périodiques de la photosynthèse et, dans une moindre

Evolution de la concentration d'anhydride carbonique dans l'atmosphère, 1958-1986



Source: Schutz der Erdatmosphäre, eine internationale Herausforderung, Rapport intérimaire de la Commission d'enquête du 11ème Bundestag, Bonn (1988).

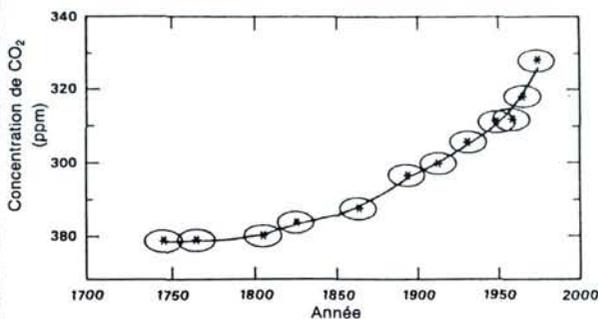
Les moyennes mensuelles et annuelles des valeurs observées à Maunahoa (Hawaï) suivent les variations saisonnières de la photosynthèse et de la température superficielle de l'océan.

mesure, à la variation annuelle de la température de la couche superficielle des océans, qui détermine la solubilité du gaz dans l'eau. La variation de la photosynthèse aquatique intervient aussi, mais faiblement. On a pu faire l'historique de la concentration en analysant l'air piégé dans les glaces. Il est apparu qu'avant la révolution industrielle et l'expansion de l'agriculture la concentration était de 275 ± 10 ppmv; actuellement, l'apport annuel de CO₂ est de $1,5 \pm 0,2$ ppmv, soit 0,4% par an* (voir la figure).

Le cycle du CO₂ est très complexe et les sources et zones d'élimination naturelles sont beaucoup plus étendues que celles qui sont associées aux activités humaines (voir le tableau). Le carbone est un élément fondamental de la vie sur la terre. Son séjour dans l'atmosphère et les milieux qui lui sont étroitement liés — biosphère et couche superficielle des océans — est de l'ordre de plusieurs centaines d'années. Dans les circonstances

* Voir *The Greenhouse Effect, Climatic Change, and Ecosystems* (SCOPE 29), op. cit.

Evolution de la concentration d'anhydride carbonique dans l'atmosphère au cours des 200 dernières années, mesurée sur des échantillons de glacier



Source: Extrait de Neftel et al., 1985, cité dans: «How much CO₂ will remain in atmosphere?», par B. Bolin, *The Greenhouse Effect, Climatic Change and Ecosystems* (SCOPE 29) (Mai 1988).

Bilan annuel mondial de l'anhydride carbonique

Sources naturelles	10 ⁹ tonnes par an	Pourcentage
Océaniques brutes	~ 376-390	~ 60
Terrestres brutes	~ 32-440	~ 36
Total	~ 619 (408-830)	~ 96
Sources artificielles		
Combustibles fossiles	~ 16-20	~ 3
Conversion des terres	~ 0-10	~ 1
Total	~ 22 (16-30)	~ 4
Total des sources	~ 642 (424-860)	100
Modes d'élimination		
Absorption océanique brute	~ 389-396	~ 64
Végétation primaire nette	~ 183-257	~ 36
Total	~ 612 (572-653)	100

Sources: A primer on greenhouse gases, Département de l'énergie des Etats-Unis (mars 1988); «Energy, climate, environment», Energy and climate change : What can Western Europe do?, Direction générale de la protection de l'environnement, Pays-Bas (février 1988).

actuelles, entre 40 et 50% seulement de la totalité des rejets de CO₂ demeurent en suspension dans l'atmosphère.

Selon les modèles actuels (où interviennent des facteurs qui demandent confirmation), le doublement de la concentration de CO₂ élèverait de 1,5 à 4,5°C la température moyenne de surface à l'équilibre. Une étude récente semble indiquer qu'il y a de bonnes raisons de réagir dès maintenant. Environ 50% de l'échauffement général est dû à l'apport de CO₂ d'origine humaine, voire plus si l'on tient compte de certains phénomènes réflexes amplificateurs comme le dégagement naturel de méthane.

Méthane. En 1985, la concentration de méthane était de 1,7 ppmv dans l'hémisphère Nord et de 1,6 dans l'hémisphère Sud. Elle tend à augmenter de 1,1 ± 0,1% par an (selon les calculs faits entre 1951 et 1983) (voir les figures). L'évolution à long terme a pu être déterminée par l'analyse de bulles d'air incluses dans les glaces du Groenland et de l'Antarctique. Le méthane provient essentiellement d'activités microbiennes au cours de la minéralisation du carbone organique dans des conditions strictement anaérobies, par exemple dans les sols marécageux et l'intestin des herbivores. Il peut être également dû à des activités humaines telles l'exploitation du gaz naturel, la combustion de biomasse et l'extraction du charbon (voir le tableau). Les émissions mondiales annuelles de méthane dues aux activités humaines se situent de manière très imprécise dans une fourchette de 135 à 395 millions de tonnes. Le méthane s'élimine principalement par réaction avec le radical hydroxyle dans la troposphère, mais aussi par transport dans la stratosphère, suivi d'oxydation. Il séjourne dans l'atmosphère entre sept et dix ans.

Notons qu'au niveau moléculaire le méthane est 32 fois plus actif que l'anhydride carbonique en ce qui concerne l'effet de serre; c'est là un fait important*.

* Schutz der Erdatmosphäre, eine internationale Herausforderung, Rapport intérimaire de la commission d'enquête du onzième Bundestag, Bonn (1988).

On évalue à environ 19% sa contribution à l'élévation actuelle de la température mondiale.

Hémioxyde d'azote. Depuis la fin du XIX^e siècle, on a pu suivre la concentration de ce gaz en analysant les inclusions d'air dans des carottes de glace prélevées dans l'Antarctique. En 1985, sa concentration était de 0,31 ppmv et elle augmente de 0,2 à 0,3% par an. L'hémioxyde d'azote persiste longtemps dans l'atmosphère où son séjour est de l'ordre de 150 ans. A l'état naturel, il provient essentiellement de l'activité des micro-organismes du sol et des eaux dans le cycle de l'azote. Les sources humaines sont l'emploi des combustibles fossiles et le travail de la terre (voir le tableau page 16). Il s'élimine principalement dans la stratosphère par photolyse et réaction avec l'oxygène. On évalue à 4% environ sa contribution à l'élévation actuelle de la température mondiale.

Chlorofluorocarbures. Les principaux sont le CFC₁₁ (CFC 11) et le CF₂Cl₂ (CFC 12). Il n'en existe pas de sources naturelles. Ce sont des produits d'origine humaine utilisés principalement comme fluides réfrigérants ou gaz propulseurs d'aérosols, et dans la fabrication des mousses de plastiques. Ils ne sont pas éliminés dans la troposphère, mais dissociés dans la stratosphère où ils contribuent à l'appauvrissement de la couche d'ozone. Leurs séjours atmosphériques sont respectivement de 75 ans pour le CFC 11 et de 110 ans pour

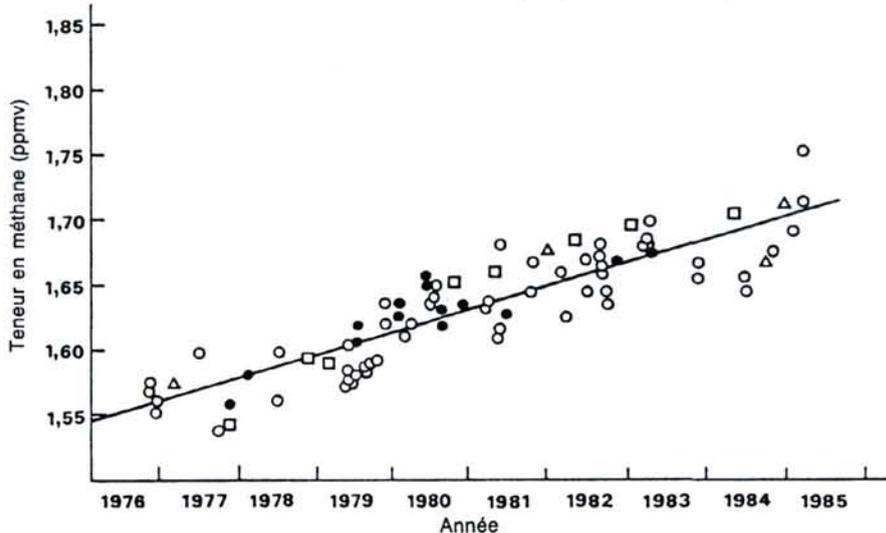
Bilan annuel mondial du méthane

Sources naturelles	10 ⁹ tonnes par an	Pourcentage
Terres marécageuses	~ 60-160	~ 24
Termites	~ 5-45	~ 5
Océans	~ 7-13	~ 2
Faune sauvage	~ 2-8	~ 1
Lacs	~ 2-6	~ <1
Toundra	~ 1-5	~ <1
Divers	~ 0-80	~ 9
Total	~ 197 (77-317)	~ 43
Sources artificielles		
Bétail	~ 40-110	~ 16
Combustion de biomasse	~ 30-110	~ 15
Rizières	~ 40-100	~ 15
Exploitation du gaz naturel et mines	~ 25-75	~ 11
Total	~ 265 (135-395)	~ 57
Total des sources	~ 462 (212-712)	100
Modes d'élimination		
Réaction avec le radical hydroxyle dans la troposphère	~ 250-450	~ 85
Réaction avec le radical hydroxyle, le chlore et l'oxygène dans la stratosphère	~ 30-70	~ 12
Absorption par les micro-organismes du sol	~ 5-15	~ 3
Total	~ 410 (285-535)	100

Sources: A primer on greenhouse gases, Département de l'énergie des Etats-Unis (mars 1988); «Energy, climate, environment», Energy and climate change : What can Western Europe do?, Direction générale de la protection de l'environnement, Pays-Bas (février 1988).

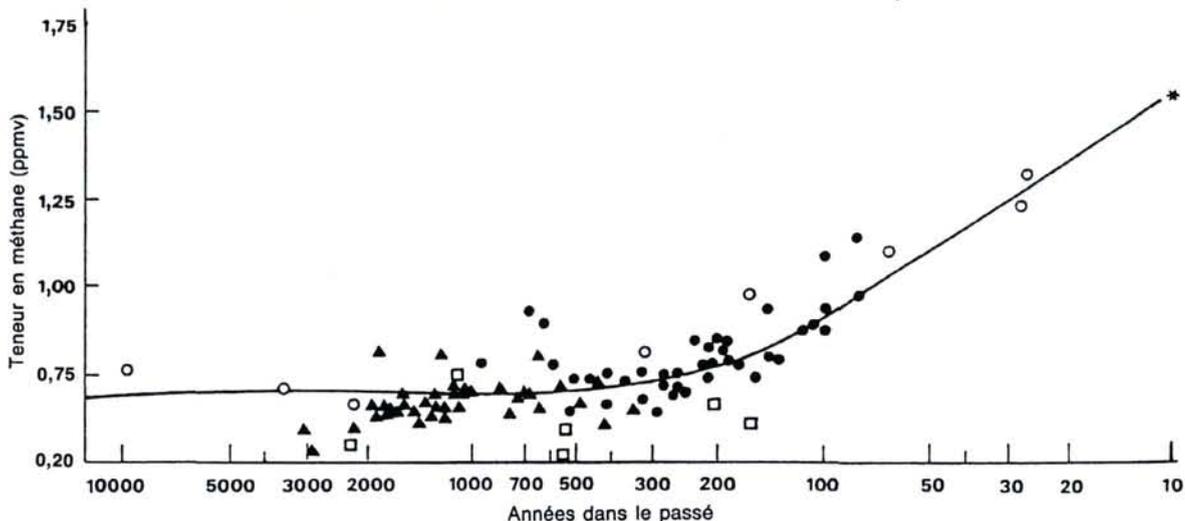
Méthane: concentrations atmosphériques hier et aujourd'hui

Evolution de la teneur en méthane dans la troposphère de l'hémisphère Nord



Les mesures ont été faites à bord d'aéronefs (points blancs), de navires (carrés) et à différentes stations terrestres en atmosphère pure (triangles). Les points noirs correspondent aux mesures faites par Rowland et col. (voir Blake, 1984) à peu près aux mêmes latitudes dans l'atmosphère du Pacifique.

Teneur en méthane des inclusions d'air dans des carottes de glace



Source: «Other greenhouse gases and aerosols» par H.-J. Bolle, W. Seiler et B. Bolin, *The Greenhouse Effect, Climatic Change, and Ecosystems* (SCOPE 29) (Mai 1988).

Les points et triangles noirs correspondent aux valeurs obtenues par Rasmussen et Khalil (1984) dans des carottes de glace prélevées au Groenland et dans l'Antarctique, respectivement. Les points blancs indiquent les valeurs de Craig et Chou (1982) et les carrés celles de Robbins et col. (1973).

le CFC 12. En 1983, les concentrations étaient de 0,2 ppmv pour le premier et de 0,31 pour le second, et l'on évalue l'augmentation à environ 5% par an.

En 1987, le problème de la destruction de l'ozone par les CFC a fait l'objet d'un accord international (le Protocole de Montréal) en vertu duquel les pays industriels s'engagent à réduire l'emploi de ces gaz de 50% d'ici à l'an 2000. Plus récemment, certaines instances internationales ont préconisé leur abolition totale.

Au niveau moléculaire, le CFC 11 et le CFC 12 sont respectivement 14 000 fois et 17 000 fois plus efficaces en ce qui concerne l'effet de serre que l'anhydride carbonique*. On a évalué à 5 et 10%, respectivement, la contribution annuelle du CFC 11 et du CFC 12 à l'échauffement actuel du globe. Entre 5 et 10% des

* Voir *The Greenhouse Effect, Climatic Change, and Ecosystems* (SCOPE 29), op. cit.

Bilan annuel mondial de l'hémioxyde d'azote

Sources naturelles	10 ⁶ tonnes par an	Pourcentage
Sols naturels	~ 9-31	~ 42
Océans et estuaires	~ 3-9	~ 13
Total	~ 12-40	~ 55
Sources artificielles		
Combustibles fossiles	~ 9-16	~ 26
Culture des sols naturels	~ 3-6	~ 9
Fertilisation des sols	~ 2-3	~ 5
Combustion de biomasse	~ 2-3	~ 5
Total	~ 22 (16-28)	~ 45
Total des sources	~ 48 (28-69)	100
Principal mode d'élimination		
Photolyse stratosphérique et réaction avec l'oxygène	~ 24-42	~ 100
Total	~ 33 (24-42)	

Sources: *A primer on greenhouse gases*, Département de l'énergie des Etats-Unis (mars 1988); «Energy, climate, environment», *Energy and climate change: What can Western Europe do?*, Direction générale de la protection de l'environnement, Pays-Bas (février 1988).

émissions sont indirectement dues à la production d'énergie en ce sens qu'elles proviennent de la fabrication de matériaux isolants.

Ozone. L'ozone est un des principaux capteurs du rayonnement solaire et de l'infrarouge. L'ozone troposphérique provient en partie tel quel de la stratosphère et en partie de réactions photochimiques dans la troposphère. L'ozone stratosphérique est essentiellement produit par photodissociation de l'oxygène moléculaire dont les atomes se combinent ensuite avec O₂ en présence d'un catalyseur. La destruction de l'ozone résulte d'une recombinaison avec des atomes d'oxygène et de réactions catalytiques. Son séjour dans la troposphère est très court (de quelques heures à quelques jours); sa concentration varie donc considérablement d'un point à un autre et il est difficile de discerner des tendances. L'information publiée signale une concentration moyenne de 0,02 à 0,1 ppmv dans la troposphère, et de 0,1 à 10 ppmv dans la stratosphère. Les mesures faites au sol et par satellite semblent indiquer que les concentrations ont tendances à décroître dans la stratosphère et à croître dans la troposphère. Actuellement, on attribue à l'ozone 8 % de l'élévation de la température mondiale.

L'industrie énergétique

Les estimations des émissions de gaz à effet de serre dues à la production d'énergie sont très variables (voir le tableau et les figures de la page 17).

Emissions mondiales d'anhydride carbonique dues à la combustion. On note depuis 1950 une augmentation constante des émissions de CO₂ avec des maxima consécutifs aux crises pétrolières de 1975 et 1979 (voir la figure). La dernière a stabilisé la consommation de pétrole, mais la consommation de gaz naturel a continué de croître; celle du charbon a sensiblement augmenté, elle aussi, et même dépassé son taux habituel, de sorte que le charbon est redevenu la principale source de

CO₂, comme vers la fin des années 60. Cette situation a abouti à des valeurs records des émissions de CO₂ en 1986, alors que la communauté scientifique recommandait, au contraire, une réduction.

Les plans prévoyant d'augmenter encore la consommation de charbon ne feront qu'aggraver le problème de façon alarmante.

Notons que si les prévisions actuelles pour l'an 2000 se réalisent, la Chine, à elle seule, consommera plus de charbon que l'ensemble des pays de l'OCDE à l'heure actuelle. L'augmentation de 40% de la consommation mondiale que l'on prévoit est à peu près égale à la consommation actuelle de ces pays, soit deux fois celle des Etats-Unis (voir le tableau).

Emissions d'anhydride carbonique par pays. Depuis 1950, on constate une forte augmentation de l'émission de CO₂ dans les pays en développement et une diminution relative de la contribution des pays industriels (voir la figure). A quelques exceptions près, l'émission par habitant s'est accrue de façon spectaculaire depuis 1950. Les différences considérables que révèlent les chiffres actuels montrent aussi à quel point il sera difficile de mettre les divers pays d'accord pour réduire les rejets, en particulier pour atteindre l'objectif fixé par la Conférence de Toronto de 1988, à savoir une réduction de 20% pour 2005. Or, il est évident que l'on ne parviendra à stabiliser les émissions que si tous les pays y contribuent, ce qui implique des stratégies différentes, elles-mêmes dépendant des aptitudes technologiques de chaque pays et des options éventuelles de remplacement.

Emissions d'anhydride carbonique par secteur. Un autre aspect important du problème est la distribution des émissions pour chaque secteur de l'économie. La production d'électricité y joue un grand rôle (voir le tableau). Sur l'ensemble de la planète, un tiers environ

Distribution en pourcentage des gaz à effet de serre produits par le secteur énergétique

	Sources naturelles	Sources artificielles
Anhydride carbonique	2-4	65-98
Méthane	10-30	16-48
Hémioxyde d'azote	18-38	65-100
Chlorofluorocarbures	n.d.	5-10*

* Résultant indirectement des économies d'énergie.

Prévisions de la consommation de charbon (en millions de tonnes d'équivalent pétrole par an)

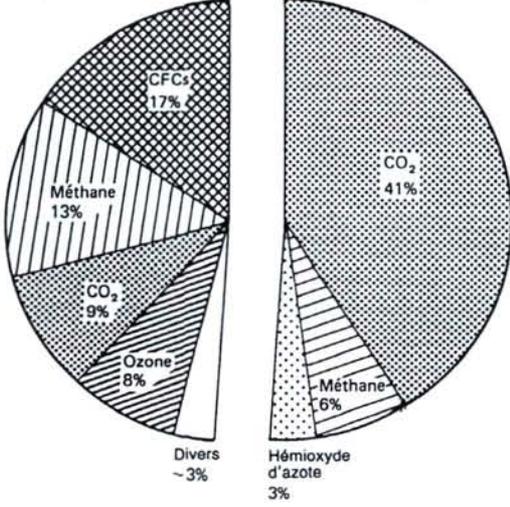
	1985-1986	2000	Augmentation
Chine	700	1400	+ 100%
Etats-Unis	680	900	+ 32%
Australie	43	62	+ 44%
Inde	140	440	+ 214%
Total mondial	3200	4500	+ 40%
OCDE	1200	1640	+ 37%

Sources: Agence internationale de l'énergie de l'Organisation de coopération et de développement économiques, 1986 (information concernant les Etats-Unis et l'Australie); Conférence mondiale de l'énergie, 1986 (totaux mondiaux).

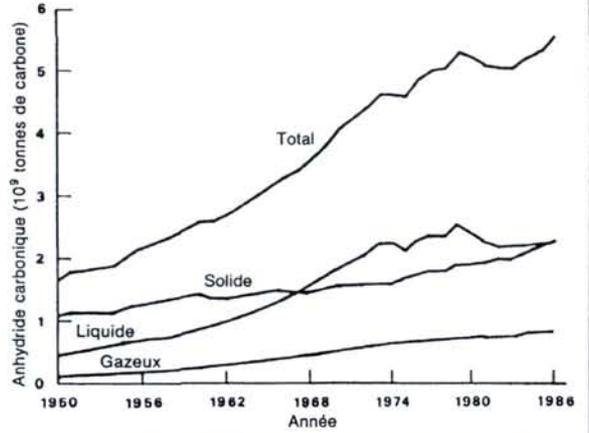
Contributions à l'élévation de la température mondiale

Sources autres que la production d'énergie 50%

Production d'énergie 50%



Emissions mondiales par type de combustible, 1950-1986



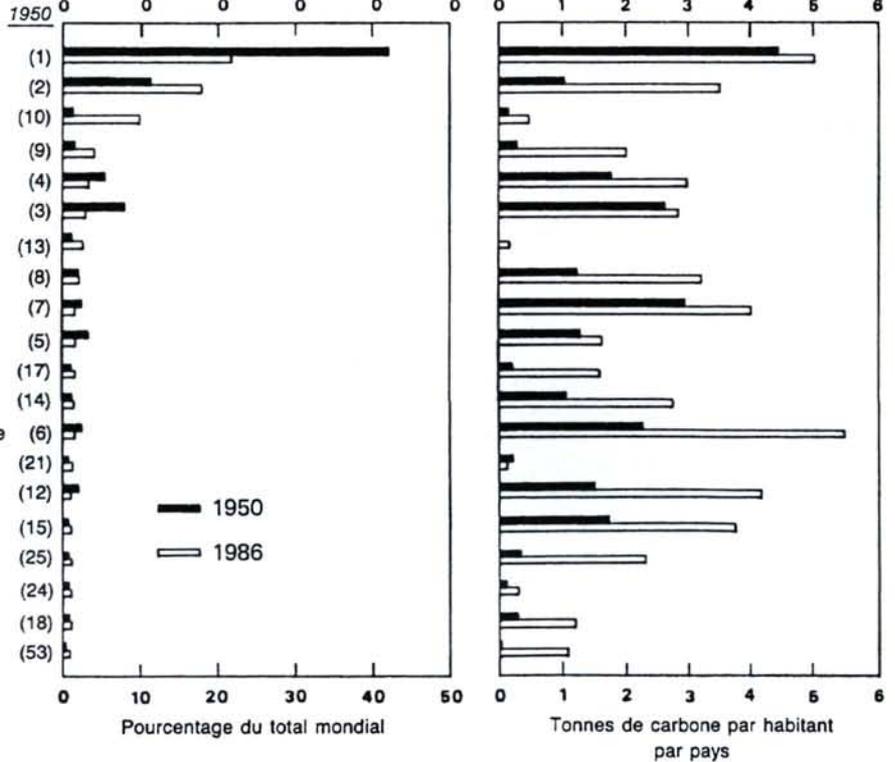
Note: Le total comprend les émissions provenant du brûlage de gaz naturel à la torche et de la préparation du ciment
 Source: Carbon Dioxide Information Analysis Center, Laboratoire national d'Oak Ridge (Etats-Unis).

Emissions d'anhydride carbonique, 1950-1986

1986

1950

- 1 Etats-Unis
- 2 URSS
- 3 Chine
- 4 Japon
- 5 République fédérale d'Allemagne
- 6 Royaume-Uni
- 7 Inde
- 8 Pologne
- 9 Canada
- 10 France
- 11 Italie
- 12 Afrique du Sud
- 13 République démocratique allemande
- 14 Mexique
- 15 Tchécoslovaquie
- 16 Australie
- 17 Roumanie
- 18 Brésil
- 19 Espagne
- 20 République de Corée



Source: Carbon Dioxide Information Analysis Center, Laboratoire national d'Oak Ridge (Etats-Unis).

Perspectives

Emissions de carbone en 1984, par région et secteur économique

	Pourcentages (arrondis)					Total (10 ⁶ tonnes)
	Industrie	Transports	Divers	Electricité	Pertes internes* (secteur de l'énergie)	
Asie	38	11	21	26	3	642,54
Afrique	28	20	11	40	1	136,31
Amérique latine	23	32	12	19	15	203,69
OCDE	23	24	17	28	8	2622,00
CAEM	21	8	17	43	11	1378,94
Total	24	18	17	32	8	4983,48

* Pertes de distribution et de transformation de l'énergie secondaire.

Note: La région Afrique comprend 17 pays plus la République islamique d'Iran (information pour 1982) et l'Algérie (information pour 1982). La région Asie comprend 15 pays plus la Chine (information pour 1980) et Taiwan (Chine) (information pour 1984). L'Amérique latine comprend 16 pays plus le Mexique (information pour 1982). Les chiffres de l'OCDE correspondent à 25 pays et ceux du CAEM, à sept pays. Plusieurs pays ont été omis ou n'interviennent que partiellement : Afrique du Sud, Algérie, Jamahiriya Arabe Libyenne, Libéria, République Arabe Syrienne, République démocratique populaire de Corée et République islamique d'Iran.

Sources: *Bilans énergétiques et profils de la production d'électricité*, Nations Unies (1982), pour l'Afrique, l'Asie et l'Amérique latine; *Bilans énergétiques, 1970-1985*, Organisation de coopération et de développement économiques (OCDE) pour les pays membres de cette organisation; *Bilans énergétiques pour l'Europe et l'Amérique du Nord, 1970-2000*, Commission économique des Nations Unies pour l'Europe, pour les pays du Conseil d'assistance économique mutuelle (CAEM).

Source: Information communiquée par T. Müller (consultant), Section de la planification et des études économiques, Division de l'énergie d'origine nucléaire, AIEA.

des émissions est imputable à cette activité, un quart à l'industrie, moins d'un cinquième tant au transport qu'aux activités diverses tels les services, l'agriculture et les besoins domestiques, et enfin moins d'un dixième aux pertes par conversion et à l'industrie de transformation. L'apport dû à la production d'énergie électrique varie entre 19% pour l'Amérique latine et 43% pour les pays membres du Conseil d'assistance économique mutuelle (CAEM).

La production d'électricité a augmenté beaucoup plus rapidement que le produit national brut ou que la production d'énergie. Dans les pays de l'OCDE, la production totale d'énergie ne s'est accrue que de 4% entre 1973 et 1985, tandis que la production d'électricité augmentait de 39%. Pour l'ensemble du monde, cette dernière a augmenté de 57% pendant la même période.

Diverses options pour limiter les émissions d'anhydride carbonique

Vu cette situation, on s'accorde à penser que nous ne pouvons plus nous permettre de continuer sur cette lancée et de rejeter dans l'atmosphère des quantités croissantes de gaz à effet de serre, et en particulier de CO₂ dont la source principale est de loin l'emploi des combustibles fossiles. Il ne faut surtout pas oublier que

le développement des systèmes énergétiques industriels suit une trajectoire historique bien déterminée que les perturbations du genre crise pétrolière n'influencent qu'accessoirement. Modifier en peu de temps une évolution séculaire n'est pas possible (ni souhaitable) si l'on considère, par exemple, la durée des investissements dans le secteur de l'énergie et leur rapport avec le développement industriel et économique.

On ne pourra résoudre le problème qu'en prenant immédiatement une série de mesures complémentaires. Chacune apportant sa contribution à la solution du problème, l'approche serait plus flexible et moins perturbante pour le développement économique, et aurait un effet cumulatif si l'on visait en même temps d'autres fins (par exemple la réduction des émissions d'autres gaz à effet de serre et autres polluants de l'atmosphère, ou la limitation des déchets).

Il ne faut cependant pas oublier que la stabilisation des émissions à leur niveau actuel n'empêchera pas les concentrations atmosphériques d'augmenter. On ne sait toujours pas quelle augmentation peut être tolérée. Il est donc d'une importance capitale de freiner cette tendance, de changer les modes de vie et de revoir les plans de développement industriel et de production énergétique tout en appliquant des stratégies facilement adaptables, vu l'inertie de l'ensemble du système. Cette action se renforcerait et s'accélélerait à mesure que le problème serait mieux compris. Rappelons à ce propos qu'un groupe de travail intergouvernemental sur les changements climatiques étudie actuellement les incidences de divers scénarios aboutissant à un doublement de la concentration atmosphérique de CO₂ d'ici 2030, 2060 et 2090 respectivement, le dernier n'impliquant aucune augmentation.

Il faut donc restructurer le système énergétique de façon à pouvoir abaisser le niveau des émissions de

Croissance du produit national brut et de la consommation d'énergie et d'électricité, 1973-1985.

	PNB	Energie	Electricité
Mondiale	42%	29%	57%
OCDE	33%	4%	39%

CO₂ par unité d'énergie fournie. Les principales options dont on dispose à cette fin sont les suivantes:

- Améliorer le rendement de l'énergie primaire à base de carbone. Cela permettrait aussi de réduire les émissions de tous les gaz à effet de serre dus à la production d'énergie.
- Remplacer le charbon par des combustibles dégageant moins de CO₂. Cette substitution aurait aussi pour effet de réduire la pollution de l'environnement. A noter cependant que pour les gaz autres que CO₂ l'effet serait peu sensible. Passer au gaz naturel, c'est accroître les émissions de méthane; selon les estimations, elles se répartissent en fractions de 1%, mais rappelons que le méthane, au niveau moléculaire, est 32 fois plus actif que le CO₂ en ce qui concerne l'effet de serre.
- Recours à l'énergie nucléaire. L'option nucléaire n'implique aucune émission de gaz à effet de serre. En outre, l'énergie nucléaire servira probablement dans l'avenir à produire de la chaleur industrielle et des carburants spéciaux pour le transport qui ne dégageront pas de gaz à effet de serre.
- Recours aux sources d'énergie renouvelables (énergie solaire et éolienne, et biomasse). Ces sources n'émettent pas de gaz à effet de serre. Actuellement, leur exploitation n'est pas rentable et, à moins d'une percée technologique, leurs applications demeureront limitées en importance et localisées. Elles constituent néanmoins un apport appréciable dans les pays où les conditions sont favorables.
- Mesures d'atténuation. Ce sont, par exemple, le reboisement ou l'évacuation de CO₂ dans les eaux océaniques profondes ou dans les gisements de pétrole ou de gaz épuisés.

Selon les pays, le choix des mesures et l'importance relative qui leur sera accordée dépendra du niveau de développement technologique et des autres options possibles.

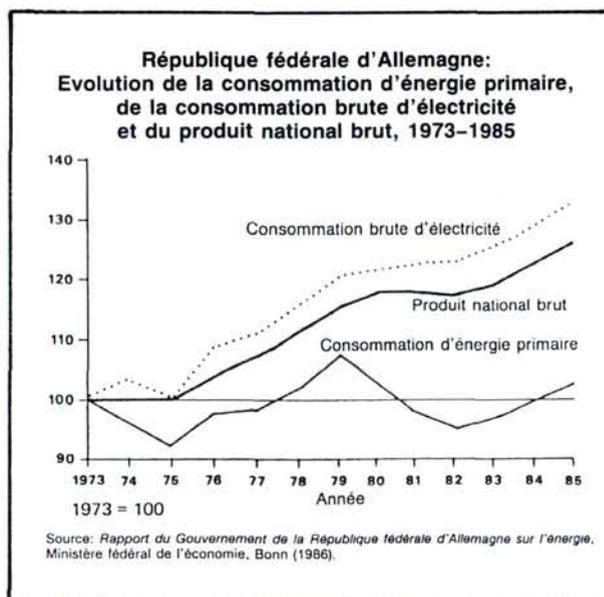
Etude de cas. Aux Etats-Unis par exemple, les émissions de CO₂ sont stabilisées depuis 15 ans et ont même diminué de 20% par unité d'activité économique; concrètement, cela signifie que les émissions de CO₂ sont passées de 470 000 à 350 000 tonnes par milliard de dollars de produit national brut (en dollars de 1982)*. Cette amélioration est due principalement à un relèvement des rendements énergétiques, à l'emploi croissant de l'électricité et à une augmentation sensible du parc nucléaire.

Les mesures prises avaient pour objet de minimiser les coûts et les effets sur l'environnement, mais sans intention déclarée de réduire au minimum les émissions de CO₂ en tant que telles.

La situation est à peu près la même en République fédérale d'Allemagne**. Entre 1973 et 1985, le PNB a augmenté (+26%) alors que les émissions d'anhydride carbonique ont diminué (-11%), conséquence des changements intervenus dans la production et l'utilisation de l'énergie:

* «Energy and the greenhouse effect», Science Concepts, Inc., Washington, DC (mars 1989).

** D'après les indications de SCOPE 29 (mentionné précédemment) et le Rapport sur l'énergie du Gouvernement de la République fédérale d'Allemagne, Ministère fédéral de l'économie, Bonn (1986).



- **Utilisation plus rationnelle de l'énergie.** A part quelques fluctuations, la consommation totale d'énergie primaire est demeurée pratiquement constante en dépit d'une hausse sensible du PNB (figure). Cette évolution était accompagnée d'une forte augmentation de la demande d'énergie électrique (cette tendance à l'électrification se manifeste dans le monde entier et dans les pays de l'OCDE en particulier). Des économies d'énergie ont été réalisées grâce à la rationalisation des produits et des services dans l'industrie, et à la limitation du chauffage des locaux et de la consommation d'essence. La consommation d'électricité a augmenté malgré l'amélioration du rendement au niveau du consommateur.

- **Remplacement des combustibles.** En 1973, les émissions de CO₂ provenant de tous les combustibles étaient inférieures de 13% à ce qu'elles auraient été si le charbon seul avait été utilisé comme source d'énergie. La différence était de 24% en 1985, la proportion de pétrole et de charbon ayant diminué au profit du gaz naturel et de l'énergie nucléaire.

- **Recours à l'énergie nucléaire.** La part du nucléaire dans la production d'énergie primaire est passée de un à 11%.

Là encore, les changements n'étaient pas motivés par le souci de réduire les émissions de CO₂, mais ils montraient que l'on pouvait les limiter en appliquant une politique systématique dans ce sens.

Politique énergétique et rôle de l'énergie nucléaire

Il est clair, toutefois, qu'une politique s'inspirant de l'exemple des Etats-Unis ou de la République fédérale d'Allemagne est mieux adaptée aux pays industriels qu'aux pays en développement. Ces derniers vont devoir augmenter sensiblement leur consommation d'énergie primaire et comptent essentiellement sur les combustibles fossiles pour y parvenir. Les pays industriels, quant à eux, sont de loin les premiers responsables de l'augmentation de la concentration atmosphérique de CO₂ et ont donc le devoir d'en réduire les émissions proportionnellement plus que les autres. De leur côté, les pays en

développement devraient recourir aux sources d'énergie renouvelable lorsque les conditions climatiques sont favorables.

L'énergie nucléaire peut beaucoup aider à résoudre le problème. Une centrale nucléaire de 1000 MW, au lieu d'une centrale au charbon de même puissance, épargne chaque année à notre atmosphère une charge de 6 millions de tonnes de CO₂. Les 430 réacteurs en service dans le monde représentent 1,6 milliard de tonnes de CO₂ en moins, soit 8% de toutes les émissions actuelles. Cette quantité n'est pas négligeable car elle équivaut à peu près à 40% de l'objectif proposé par la Conférence de Toronto. Pour aboutir au même résultat par le reboisement, il faudrait disposer de très grandes superficies. En République fédérale d'Allemagne, par exemple, la forêt fixe environ trois tonnes de carbone par hectare et par an, que les arbres assimilent pour se développer. Elle en fixerait le double dans des conditions plus favorables. De fait, un hectare de forêt absorbe entre dix et 20 tonnes de CO₂ atmosphérique, selon les conditions climatiques. Il faudrait donc compter 3000 à 6000 km² de forêt pour résorber le CO₂ que nous épargne un réacteur de 1000 MW lorsqu'il remplace une centrale au charbon de puissance comparable. Ainsi, la totalité des centrales nucléaires actuelles, soit 1,6 milliard de tonnes de CO₂ en moins, est l'équivalent de un à deux millions de kilomètres carrés de forêts, c'est-à-dire quatre à huit fois la superficie de la République fédérale d'Allemagne, sans compter que les arbres, à la fin de leur existence, doivent être enfouis et isolés de l'air à jamais pour éviter le dégagement de CO₂ par oxydation.

Dans nombre de pays, il est encore possible de développer sensiblement le parc nucléo-électrique vu l'augmentation rapide de la consommation. Cela dit, au-delà du double de la puissance installée actuelle on se heurterait à de nouveaux problèmes au niveau de la sûreté nucléaire, des installations du cycle du combustible et du Système international des garanties. Par ailleurs, pour que les pays en développement s'intéressent davantage à l'énergie nucléaire, il conviendrait de revoir certaines questions de principe, notamment celles du financement et de la coopération internationale aux divers échelons du cycle du combustible nucléaire.

Vu la responsabilité particulière des pays industriels en ce qui concerne les émissions de CO₂, et compte tenu de leurs moyens technologiques, il est de leur devoir d'utiliser au maximum les types de réacteurs actuels et de réaliser sans plus attendre des réacteurs de pointe de moindre puissance, fondés sur une technologie simplifiée et normalisée et dotés de meilleures caractéristiques de sûreté intrinsèque. Diverses filières de ce genre, notamment le réacteur à haute température, sont à l'étude et feront leur entrée sur le marché dans quelques années. En fin de compte, après avoir réexaminé

certain aspects de l'élimination des déchets, de l'offre de combustible et de la question de la prolifération, il y aura peut-être lieu d'étudier des réacteurs de conception très différente, fondés sur des principes techniques et des cycles du combustible entièrement nouveaux, après avoir réexaminé certains aspects de l'élimination des déchets, de l'offre de combustible et de la question de la prolifération. Une telle approche aiderait peut-être aussi à résoudre, en partie tout au moins, le problème de l'acceptation du nucléaire par le public.

Conclusions

- Vu l'importance du phénomène, il faut agir maintenant, notamment en prenant des mesures rentables et utiles à d'autres égards sur le plan de l'environnement et de l'économie.
- Les options choisies doivent renforcer les tendances positives actuelles de façon à perturber le moins possible le développement de la société.
- Tous les pays, et plus spécialement les pays industriels, devraient prendre des mesures pour améliorer le rendement de l'énergie primaire à base de carbone, veiller à remplacer les combustibles, utiliser l'énergie nucléaire quand c'est possible et recourir aux sources d'énergie renouvelables lorsque les circonstances s'y prêtent.
- L'effort de chaque pays pour réduire les émissions de CO₂ devrait être fonction de ses moyens technologiques, de son économie, des autres options énergétiques possibles, et de sa contribution à la pollution de l'atmosphère par le CO₂ dans le passé.
- Outre la réduction des émissions de CO₂, le rendement énergétique, le remplacement des combustibles et le recours à l'énergie nucléaire ont d'autres effets souhaitables sur l'environnement.
- On ne peut rien dire de définitif sur l'échauffement général de l'atmosphère terrestre. Il se peut que le problème soit plus grave, ou moins grave, qu'on ne le pense aujourd'hui. Il importe donc avant tout d'adopter dès maintenant une stratégie qui permette de changer de cap dans l'avenir. Cela est surtout vrai en ce qui concerne l'énergie nucléaire, car il sera peut-être nécessaire de construire ultérieurement un grand nombre de réacteurs. C'est pourquoi les pays industriels devraient se soucier en toute priorité de mettre une technologie nucléaire de pointe sur le marché.
- Les pays industriels devraient aider les pays en développement à réduire les émissions de CO₂. L'opération pourrait être très rentable là où les coefficients de réduction sont actuellement faibles.
- Parallèlement à la réduction des émissions de gaz à effet de serre dus à la production d'énergie, il faut prendre des mesures pour éviter les rejets provenant d'autres sources.

