

# Le problème de l'anhydride carbonique

---

par F. Niehaus

## INTRODUCTION

Le choix d'un système énergétique doit tenir compte de toutes les solutions possibles. Il faut donc être renseigné sur les risques et les avantages de ces solutions. Les risques de l'énergie d'origine nucléaire ont déjà fait l'objet de longs débats, dans lesquels cette énergie a fait figure de symbole du progrès technique en général (Ref. 1). Pour prendre une décision rationnelle, il faut cependant placer l'énergie nucléaire sous son vrai jour, c'est-à-dire l'envisager par rapport aux risques et aux avantages des autres solutions possibles. L'un des risques qui pourraient à la longue affliger le monde entier est celui des rejets d'anhydride carbonique (CO<sub>2</sub>) dus à l'emploi des combustibles fossiles.

## LA MESURE DE LA TENEUR EN CO<sub>2</sub> DE L'ATMOSPHERE

On constate depuis un siècle une augmentation constante de la teneur de l'atmosphère en anhydride carbonique. Les chiffres les plus fiables, qui portent sur les années 1958 et suivantes, ont été établis méthodiquement à Mauna Loa (Hawaii). Ils sont en partie reproduits sur la couverture du présent Bulletin. Les variations saisonnières sont dues au cycle naturel de la croissance et de la décomposition des végétaux, aux variations de la solubilité à la surface des océans, et à celles des rejets provenant de la production d'énergie. C'est pourquoi les maxima apparaissent au printemps. Les variations sont en raison inverse de l'altitude et augmentent à mesure que l'on va vers le Nord. La figure 1 montre que l'on a surveillé les teneurs en anhydride carbonique dans le monde entier (Ref. 2). Leur augmentation se produit dans l'hémisphère austral deux ans environ après son apparition dans l'hémisphère boréal.

Les chiffres recueillis antérieurement sont moins fiables. Ils donnent toutefois à penser qu'avant l'ère industrielle l'atmosphère contenait environ  $295 \pm 5$  ppm en volume de CO<sub>2</sub>. La teneur a donc augmenté de plus de 10% depuis le début de l'industrialisation.

## L'ANHYDRIDE CARBONIQUE – EN QUOI POSE-T-IL UN PROBLEME

Dans les proportions que nous venons de signaler, le CO<sub>2</sub> n'est pas toxique, et il ne faut pas le confondre avec l'oxyde de carbone qui, lui, est très dangereux. Le CO<sub>2</sub>, tout au contraire, favorise la croissance des végétaux en leur apportant, en même temps que l'eau, les substances nécessaires à la photosynthèse. Le principal risque que présente l'augmentation de la teneur en CO<sub>2</sub> de l'atmosphère est son effet sur l'équilibre des rayonnements au sein de cette dernière: c'est ce qu'on appelle l'effet de serre.

La réflectivité (albedo) de l'atmosphère étant d'environ 29%, on calcule que la température d'équilibre est de  $-19^{\circ}\text{C}$ , soit  $34^{\circ}\text{C}$  au-dessous de la température moyenne constatée, qui est d'environ  $+15^{\circ}\text{C}$ . Cette différence importante, indispensable à la vie sur la terre, est due au fait que l'atmosphère joue le rôle d'une fenêtre (transparente à 48%) pour le rayonnement solaire qui se dirige vers la terre, alors qu'elle absorbe (transparente à 20%)

---

M. Niehaus est directeur du projet commun AIEA/IIAAS d'évaluation des risques.

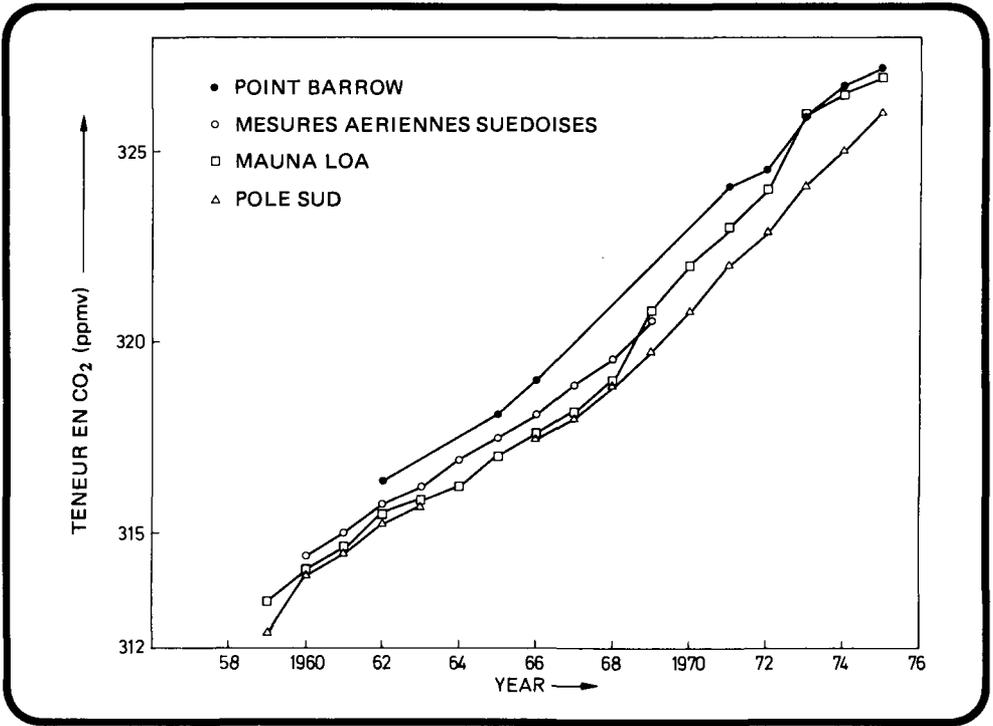
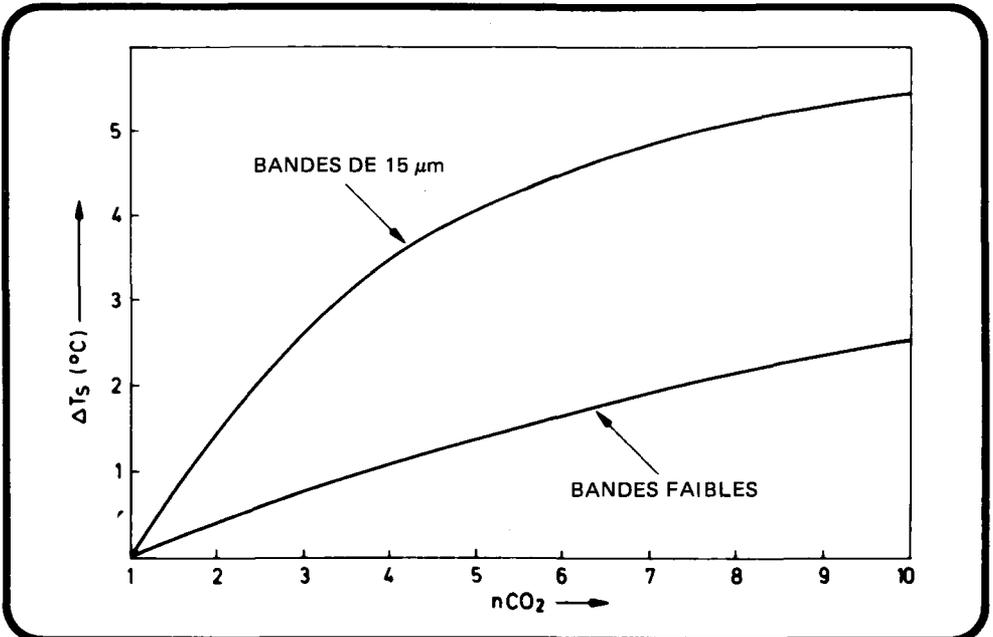


Figure 1. Augmentation globale de la teneur en CO<sub>2</sub> de l'atmosphère (Ref. 2).

Figure 2. Effet de l'augmentation de la teneur en CO<sub>2</sub> de l'atmosphère sur la température. Le doublement du total des deux apports donne 1,98°C (2 nCO<sub>2</sub> = 640 ppm) (Ref. 3).



les rayons infrarouges émis par notre planète. L'atmosphère est donc comme une couverture qui tient la terre au chaud. Cet effet est analogue à celui que produisent les toits en verre des serres, et lui doit son nom. Il est principalement dû à la présence de la vapeur d'eau et de l'anhydride carbonique.

On a construit des modèles qui simulent ce comportement de l'atmosphère pour calculer les effets des variations de la teneur en anhydride carbonique. D'après tous les calculs, le doublement de la teneur de l'atmosphère en  $\text{CO}_2$  entraîne une hausse de température de 2 à 3°C selon les hypothèses retenues pour d'autres paramètres (altitude ou température fixe du sommet des nuages). La figure 2 donne les valeurs minimales de la courbe des températures en fonction des teneurs en  $\text{CO}_2$  (Ref.3). Elle montre le rôle que jouent deux bandes d'absorption, dont l'une atteint un palier aux teneurs élevées. Tant que la teneur de l'atmosphère en  $\text{CO}_2$  n'a pas doublé, la courbe des températures reste presque linéaire.

Ces chiffres portent sur les variations de température dans la partie basse de la troposphère. La figure 3 montre que les variations de température diminuent lorsque l'altitude augmente, voire deviennent négatives au delà d'une altitude d'environ 10 km (Ref. 4). Cette constatation a donné lieu à un grave malentendu dans le passé, car on avait fait observer (Ref. 5) que la teneur en  $\text{CO}_2$  suffisait déjà à absorber 98,5% du rayonnement dans les bandes d'absorption correspondantes. On en avait conclu à tort que le  $\text{CO}_2$  ne pouvait exercer que des effets insignifiants. Or la figure 3 démontre que s'il en est bien ainsi pour l'ensemble de l'atmosphère, un réchauffement sensible se produit dans la partie basse de la troposphère, où un doublement de la teneur en  $\text{CO}_2$  entraîne la même absorption au bout d'un parcours moitié moins long.

Les chiffres de la figure 2 sont valables pour les latitudes basses et moyennes. Vu la stabilité qui règne dans les régions polaires et sub-polaires, il faut, dans leur cas, appliquer un coefficient voisin de 3 (Ref. 6).

## POURQUOI LA TENEUR EN $\text{CO}_2$ DE L'ATMOSPHERE AUGMENTE-T-ELLE?

Il y a une centaine de millions d'années, l'énergie solaire a été emmagasinée par photosynthèse sous forme de composés organiques. En brûlant des combustibles fossiles, on libère cette énergie, principalement par conversion du carbone en anhydride carbonique. La gamme des rejets va de 3,4 tonnes d'anhydride carbonique par tonne d'équivalent-charbon pour le lignite à 1,9 tonnes pour le gaz naturel. On peut, à partir de ces valeurs, calculer les rejets totaux. Ils s'élevaient à l'heure actuelle à environ  $20 \times 10^9$  tonnes de  $\text{CO}_2$  par an. La quantité totale émise depuis 1850 se monte à environ  $500 \times 10^9$  tonnes. Des échanges se produisent continuellement entre l'anhydride carbonique de l'atmosphère (soit environ  $2600 \times 10^9$  tonnes) et le carbone contenu dans l'eau de mer (100 m de couche superficielle emmagasinent quelque  $840 \times 10^9$  tonnes de carbone, les eaux profondes environ  $36\,000 \times 10^9$  t de carbone et les matières organiques  $830 \times 10^9$  tonnes), ainsi que le carbone contenu dans la biomasse terrestre (environ  $1500 \times 10^9$  tonnes). De par leurs poids moléculaires respectifs, 12 grammes de carbone équivalent à 44 grammes d'anhydride carbonique. Comme 50 pour cent environ du  $\text{CO}_2$  rejeté reste dans l'atmosphère, on suppose que la plus grande partie du reste est absorbée par les océans. Plusieurs calculs effectués sur des modèles du cycle global du carbone ont confirmé cette hypothèse. Des mesures de teneur en carbone 13 récemment faites sur les cernes annuels des arbres paraissent indiquer qu'outre les rejets provenant de l'emploi des combustibles fossiles, l'atmosphère reçoit également un apport de  $\text{CO}_2$  dû aux grands déboisements. Ces calculs ne sont toutefois pas très fiables: on n'a mesuré que quelques arbres, les chiffres sur le déboisement ne sont que des extrapolations faites à partir de surfaces très limitées et l'on ne connaît pas de processus qui puisse expliquer l'apport supplémentaire de  $\text{CO}_2$  que les océans doivent alors avoir reçu.

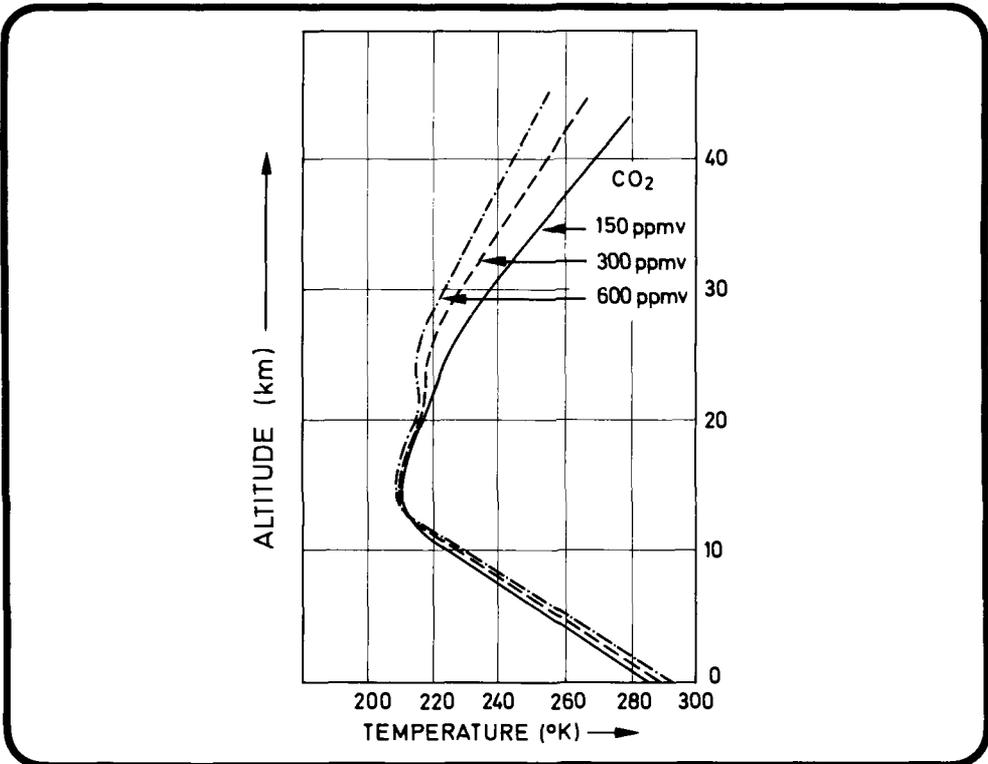
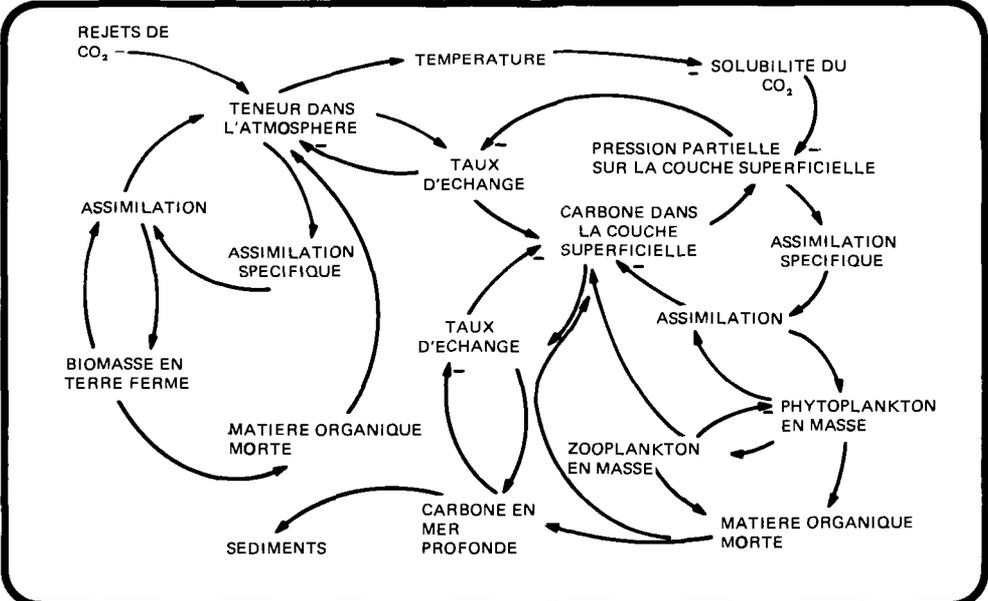


Figure 3. Profils verticaux de la température de l'atmosphère pour diverses teneurs en CO<sub>2</sub> (Ref.4).

Figure 4. Boucle du cycle du carbone.



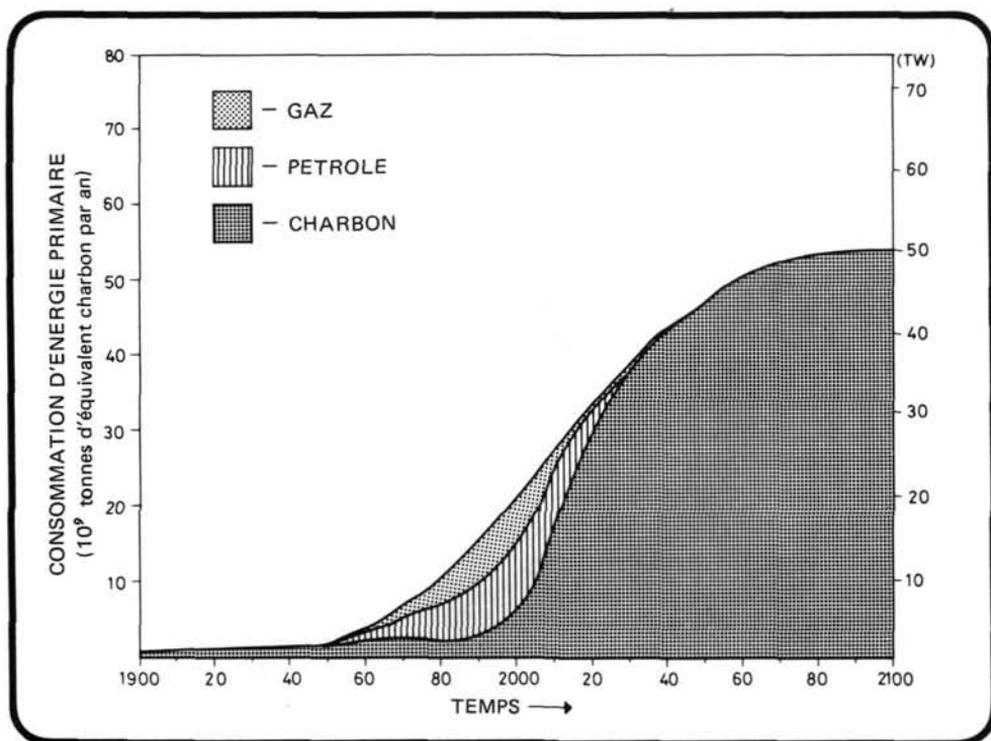
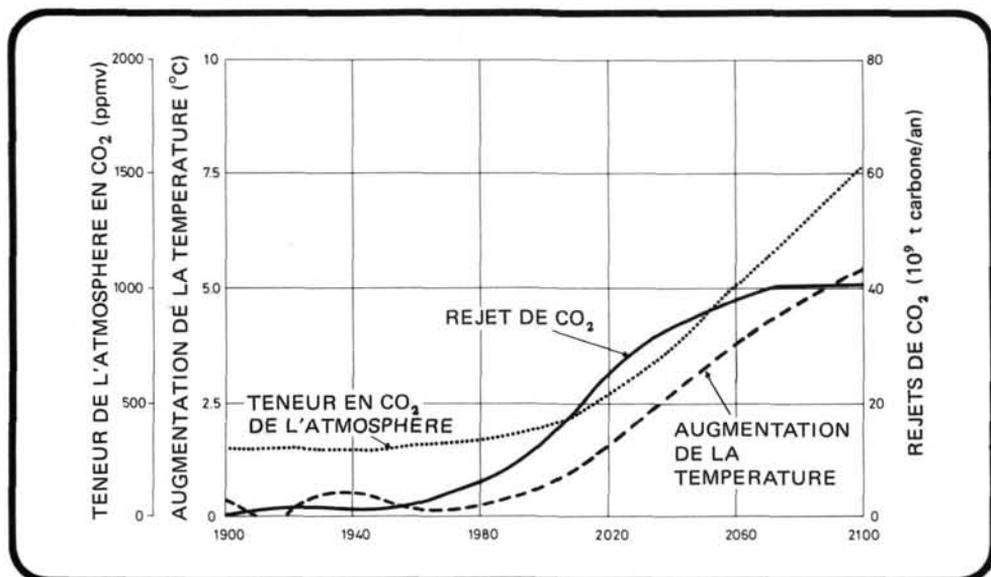


Figure 5. Scénario pour 50 TW d'énergie fournie par combustibles fossiles.

Figure 6. Incidence sur le  $CO_2$  de la stratégie pour 50 TW fournis par combustibles fossiles.



Les calculs qui vont suivre s'appuient donc sur un modèle (Ref. 7) du cycle global du carbone qui suppose, comme d'autres modèles (Ref. 8), que la légère augmentation de croissance des végétaux est due à une élévation de leur taux d'assimilation.

## L'EVOLUTION FUTURE DE L'ANHYDRIDE CARBONIQUE

Le modèle employé dans le cas qui nous occupe fait état du cycle global du carbone tel qu'il est défini par la boucle de la figure 4. On l'a appliqué aux chiffres recueillis sur l'augmentation de la teneur en  $\text{CO}_2$ , sur la dilution relative du rapport entre les isotopes carbone 14 et carbone 12 (effet Suess), et sur la diminution de la teneur en carbone 14 de l'atmosphère constatée après la cessation des essais de bombes nucléaires.

On peut introduire dans le modèle plusieurs scénarios énergétiques pour calculer les teneurs en anhydride carbonique et les variations de température qui en résulteraient.

Envisageons deux scénarios qui donneraient, à la fin du siècle prochain, une consommation totale d'énergie primaire de 50 terawatts (50 000 000 de MW). Un tel scénario représenterait en moyenne, pour une population du globe atteignant 10 milliards d'habitants, une consommation d'énergie par tête à peu près égale à celle des pays d'Europe. Pour préciser les ordres de grandeur, on peut comparer ce chiffre aux quelque 8 terawatts (TW) que nous consommons aujourd'hui.

## UNE STRATEGIE POUR 50 TW FOURNIS PAR DES COMBUSTIBLES FOSSILES

La figure 5 représente un scénario dans lequel la totalité de l'énergie serait fournie par des combustibles fossiles, ce qui consommerait presque toutes les réserves de charbon, estimées à environ  $4300 \times 10^9$  d'équivalent-charbon (Ref. 9). La figure 6 montre les résultats que donne le modèle pour une telle stratégie. Le rejet maximal de  $\text{CO}_2$  serait d'environ  $40 \times 10^9$  de carbone par an et la teneur en  $\text{CO}_2$  de l'atmosphère atteindrait, estime-t-on, environ 5 fois sa valeur d'avant l'ère industrielle. D'après les chiffres de la figure 2, la variation moyenne de la température du globe serait supérieure à  $5^\circ\text{C}$ . Si l'on prend un scénario comportant une consommation totale de 30 TW seulement, la teneur à la fin du siècle prochain serait environ quadruple de celle d'aujourd'hui et l'augmentation de température de  $4^\circ\text{C}$ .

## STRATEGIE POUR 50 TW FOURNIS PAR L'ENERGIE SOLAIRE ET NUCLEAIRE

D'après les estimations actuelles de l'effet de serre du  $\text{CO}_2$ , ces scénarios entraîneraient de profondes transformations du climat. On a donc imaginé un scénario permettant de limiter l'augmentation de température à  $1^\circ\text{C}$ . On a imaginé l'existence, en l'an 2000, d'un "avertisseur de  $\text{CO}_2$ " qui déclencherait la décision de réduire les rejets de  $\text{CO}_2$ . La figure 7 illustre une telle stratégie au moyen d'un scénario comportant 50 TW fournis par l'énergie solaire et nucléaire. La figure 8 en montre les résultats. Le maximum des rejets (environ  $10 \times 10^9$  tonnes de carbone par an) a lieu au tournant du siècle. La teneur de  $\text{CO}_2$  de l'atmosphère atteindrait un maximum de 430 ppm en 2050 pour diminuer lentement ensuite. L'augmentation maximale de la température serait de  $0,6^\circ\text{C}$  par rapport à ce qu'elle est aujourd'hui.

## EFFETS DES TRANSFORMATIONS DU CLIMAT

Les températures mentionnées proviennent de calculs sur l'équilibre des rayonnements dans l'atmosphère. Mais on ne sait pas grand chose de ce que seraient les modifications des zones de pression, de la nébulosité, des précipitations, etc. L'étude de l'histoire du climat montre que le passé a connu de grandes transformations très rapides du climat. La figure 9 montre qu'elles ont accompagné des variations de température de  $2$  à  $4^\circ\text{C}$  et se sont produites en

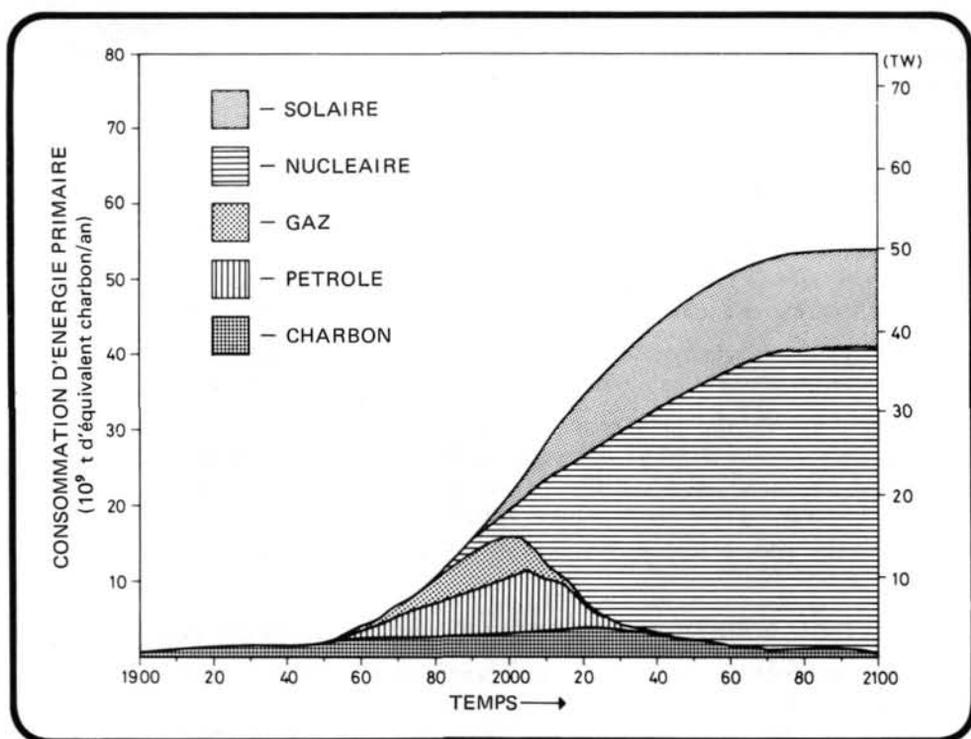
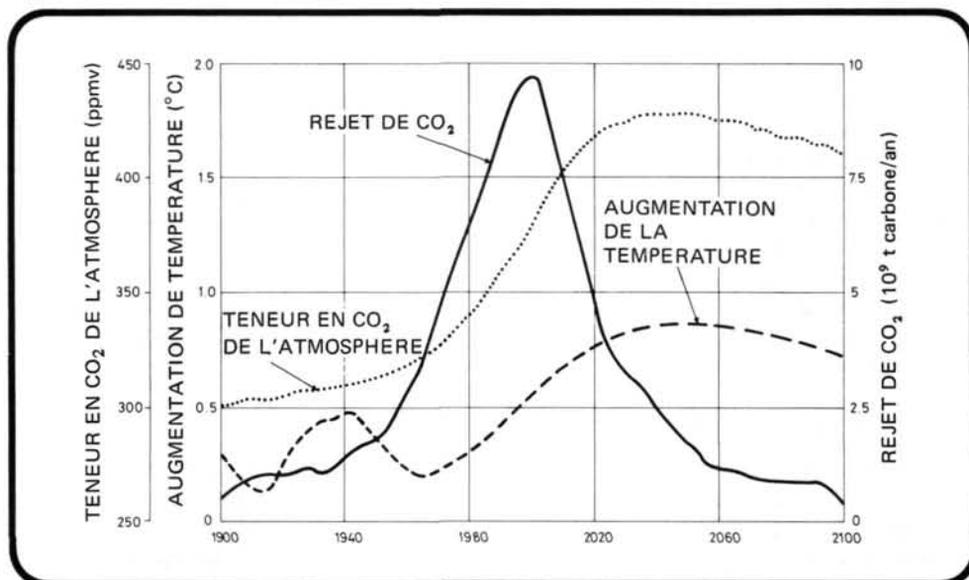


Figure 7. Scénario pour 50 TW d'énergie solaire et nucléaire.

Figure 8. Incidence sur le CO<sub>2</sub> du scénario de 50 TW d'énergie solaire et nucléaire.



quelques décennies seulement, au bout desquelles le climat s'est de nouveau stabilisé à un niveau très différent (Ref. 10). Il se peut donc que de petites modifications aient des effets considérables.

On peut résumer comme suit les risques que présente une augmentation de la température:

**a) Incidence sur la production alimentaire**

On a estimé à 1 à 3% en moyenne la diminution de la production alimentaire mondiale qu'entraînerait une augmentation de température de 1°C (Ref. 11). Ceci signifie que certaines parties du monde pourraient être beaucoup moins bien pourvues qu'aujourd'hui tandis que d'autres verraient leur situation s'améliorer. Au fond, il s'agit là d'un problème d'adaptation car les transformations pourront se produire de façon discontinue, elles ne seront pas immédiatement détectées, et l'adaptation de nouvelles pratiques agricoles pourra prendre du temps.

**b) Fonte de la couche glacée de l'Atlantique Nord**

Comme cette couche n'est pas très épaisse, une augmentation de la température pourrait la faire fondre en quelques dizaines d'années. On a signalé plus haut que les régions polaires sont plus sensibles que d'autres aux variations de la teneur de l'atmosphère en anhydride carbonique. Cette fusion modifierait sensiblement l'albedo et entraînerait un déplacement des zones climatiques vers le Nord.

**c) Désintégration de la couche glacée de l'Antarctique Ouest**

Cette désintégration ferait monter de 4 m le niveau des océans. Elle prendrait toutefois environ mille ans (Ref. 12).

**d) Fonte des calottes glaciaires des pôles**

Elle ferait monter le niveau des océans de 60 m environ. La durée du processus serait toutefois de quelque 10 000 ans.

**PEUT-ON ELIMINER L'ANHYDRIDE CARBONIQUE DE L'ATMOSPHERE?**

Supposons que la teneur en CO<sub>2</sub> de l'atmosphère double et atteigne environ 600 ppm. Dans le premier scénario, cette situation pourrait se produire dans quelque 50 ans. Supposons en outre que d'importantes modifications climatiques se soient produites et qu'on ait décidé de réduire de 100 ppm cette teneur. Quelle serait la difficulté de cette entreprise qui équivaldrait à éliminer un sixième du CO<sub>2</sub> de l'atmosphère?

Un calcul sommaire suffit à montrer qu'en admettant une vitesse d'aspiration de l'air de plus de 30 km/h, il faudrait plus de mille usines chimiques ayant chacune 100 m de hauteur et 1 km de longueur, fonctionnant pendant 30 ans pour éliminer une telle quantité de CO<sub>2</sub>.

**CONCLUSIONS**

Ces calculs montrent les risques que peut présenter une augmentation de la teneur en CO<sub>2</sub> de l'atmosphère. A l'heure actuelle, il ne paraît pas urgent de réduire la consommation de combustibles fossiles. Il y a encore beaucoup à faire pour mieux comprendre le problème du carbone 13 et l'incidence éventuelle des modifications du climat. La plupart des savants admettent que l'humanité a encore dix ans devant elle pour résoudre ce problème. D'autre part, il ne paraît y avoir aucune raison d'intensifier plus que de besoin l'emploi des combustibles fossiles.

Cet article n'entend pas provoquer des inquiétudes ni des terreurs, mais compléter l'information nécessaire pour prendre une décision rationnelle sur les approvisionnements futurs en énergie, décision qui doit tenir compte de tous les risques et de tous les avantages des systèmes d'énergie possibles.

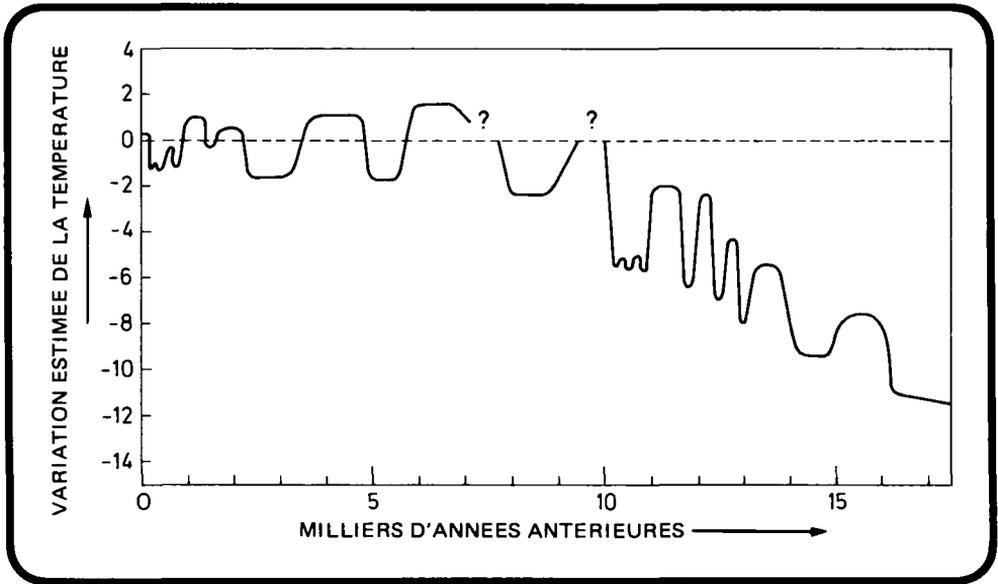


Figure 9. Modifications du climat en Europe centrale (Ref. 10).

#### Références

- [1] Otway, H.J., Fishbein, M., Public Attitudes and Decision Making, International Institute for Applied Systems Analysis Research Memorandum-77-54, Laxenburg, Autriche (1977).
- [2] Kellogg, W.W., "What If Mankind Warms the Earth?" Bulletin of the Atomic Scientists (février 1978).
- [3] Augustsson, T., Ramanathan, V., "A Radiative-Study of the CO<sub>2</sub> Climate Problem", Journal of Atmospheric Science, **34** (1977) 448-51.
- [4] Manabe, S., Wetherald, R.T., "Thermal Equilibrium of the Atmosphere with a Given Distribution of Relative Humidity", Journal of Atmospheric Science, **24** (1967) 241-59.
- [5] Schack, A., "Der Einfluss des Kohlendioxid-Gehaltes der Luft auf das Klima der Welt", Physikalische Blätter, **1**, (1972) 26-28.
- [6] Manabe, S., Wetherald, R.T., "The Effects of Doubling the CO<sub>2</sub>-Concentration on the Climate of a General Circulation Model", Journal of Atmospheric Science, **32** (1975) 3-15.
- [7] Niehaus, F., Computersimulation langfristiger Umweltbelastung durch Energieerzeugung (Kohlendioxid, Tritium und Radio-Kohlenstoff), Birkhäuser Verlag, Basel und Stuttgart (1977).
- [8] Oeschger, H., et al., A Box Diffusion Model to Study the Carbon Dioxide Exchange in Nature, Tellus XXVII (1975).
- [9] Riedel, C., Zero Order Evaluation of the Supply/Demand Situation in the Various World Regions (1975-2025). Discussion paper, IIASA Workshop on Energy Strategies: Conception and Embedding, May 17-18, Institut international d'analyse appliquée des systèmes, Laxenburg, Autriche (1977).
- [10] Flohn, H., "Stehen wir vor einer Klima-Katastrophe?", Umschau 77, Heft 17 (1977).
- [11] Bach, W., The Potential Consequences of Increasing CO<sub>2</sub> Levels in the Atmosphere; février 1978, IIASA Workshop on Carbon Dioxide, Climate and Society, Institut international d'analyse appliquée des systèmes, Laxenburg, Autriche (1978).
- [12] Hughes, T., "Is the West Antarctic Ice Sheet Disintegrating?" Journal of Geophysical Research, **78**, **33** (1973) 7884-8910.