

## Les échantillons de glace le prouvent

# Pas d'augmentation de la teneur en CO<sub>2</sub>

ZBIGNIEW JAWOROWSKI

*Les partisans du réchauffement global appuient leurs thèses sur la teneur en dioxyde de carbone des bulles d'air emprisonnées dans la glace. Ces analyses simplistes se fondent sur des données biaisées et manifestent une ignorance des processus physiques de formation de la glace polaire.*

Zbigniew Jaworowski, M.D., Ph.D. et D.Sc est un scientifique pluridisciplinaire. Il est professeur au Laboratoire central de protection radiologique à Varsovie (Pologne). Il fut le président du Comité scientifique des Nations unies sur les effets des radiations atomiques (UNSCEAR). Il a également étudié les échantillons de glace venant du monde entier pour y analyser les traces de métaux lourds et de radionucléides.



Quand la science des climats n'était pas dominée par l'idéologie, on supposait généralement que les variations climatiques s'inscrivaient dans le cadre des cycles astronomiques, qui se mesurent en dizaines ou centaines de milliers d'années. Les longs cycles glaciaires de 100.000 ans sont déterminés par les variations périodiques dans l'excentricité, l'inclinaison et la précession de l'axe de la Terre. Entre les périodes glaciaires, il y a des périodes d'environ 10.000 ans caractérisées par des climats relativement plus doux. Actuellement, nous vivons la fin d'une période interglaciaire et nous entrons sans doute déjà dans une période glaciaire.

Les âges glaciaires passés, comme celui dans lequel nous entrons, ont leur propre calendrier assez indépendant des émissions industrielles de gaz carbonique. Aucun scientifique connaissant ces cycles astronomiques ne devrait se laisser impressionner par ces hauts et ces bas des températures locales et globales, dont les variations s'expriment en années ou dizaines d'années. Ils ne devraient pas non plus s'inquiéter outre mesure des modélisations à court terme d'ordinateur ou des histoires terrifiantes concernant le réchauffement global.

Les temps ont changé, ainsi en est-il de l'idéologie environnementaliste; mais les longs cycles climatiques n'ont pas changé pour autant. Ce qui signifie que l'on peut affirmer, à partir de l'expérience de plusieurs millions d'années, que le monde s'avance inexorablement vers une autre période glaciaire, et ce quelle que soit l'intensité de la propagande à propos du réchauffement global. Les nombreuses erreurs expérimentales concernant l'hypothèse du réchauffement global peuvent toutes être démontées une à une. Il reste que le climat doit être étudié sur une longue période historique, pas sur le court terme. Cet article examine l'un des piliers principaux sur lequel reposent les thèses du réchauffement global : l'affirmation selon laquelle les données issues des carottes glaciaires — l'analyse des bulles d'air emprisonnées dans la glace de l'Antarctique et du Groenland — prouveraient que le gaz carbonique atmosphérique (CO<sub>2</sub>) a augmenté depuis l'âge préindustriel, à cause de la combustion du charbon et du pétrole et d'autres activités humaines. — La Rédaction

**D**epuis ses débuts, l'hypothèse d'un effet de serre anthropique fut entachée par une sélection tendancieuse des données, des présupposés ad hoc non vérifiés expérimentalement et des interprétations partisans. De cette « science pathologique », pour reprendre les termes d'Irving Langmuir<sup>1</sup>, on retrouve des symptômes affligeants dans les écrits de G.S. Callendar, que l'on peut considérer comme le véritable auteur de l'hypothèse moderne du « réchauffement global de l'atmosphère causé par l'homme ». En 1938, Callendar relança l'idée aujourd'hui centenaire de Svante Arrhenius d'un réchauffement climatique dû à l'homme<sup>2</sup>. Callendar affirmait que la consommation de charbon et de pétrole avait fait passer la concentration atmosphérique moyenne en gaz carbonique (CO<sub>2</sub>) de 274 parties par million en volume (ppmv) au XIX<sup>e</sup> siècle, à 325 ppmv en 1935, c'est-à-dire une augmentation de 18,6% ; et qu'entre 1880 et 1935, ceci provoqua un réchauffement de la surface terrestre de 0,33°C<sup>3-5</sup>. Toutefois, les concentrations de CO<sub>2</sub> mesurées au XIX<sup>e</sup> siècle s'étalent de 250 à 550 ppmv (Figure 1) et la concentration moyenne estimée de ces chiffres est de 335 ppmv<sup>6</sup>.

On peut observer une tendance à la baisse, non significative, des valeurs de la figure 1, elle-même corrélative à un refroidissement de la surface de la Terre<sup>7</sup>, entre 1860 et 1900, quand la consommation de combustibles fossiles a fait augmenter les

émissions de CO<sub>2</sub> de 91,5 à 485,6 millions de tonnes de carbone. En fait, on pourrait l'expliquer par un plus faible dégazage en CO<sub>2</sub> de l'océan plus froid, suite à une fluctuation climatique naturelle<sup>8</sup>.

Pour afficher une si faible concentration en CO<sub>2</sub> au XIX<sup>e</sup> siècle, argument clef de son hypothèse, Callendar opéra une sélection arbitraire des données. Sur une liste de vingt-six relevés moyens du XIX<sup>e</sup> siècle, Callendar en a rejeté seize qui indiquent des concentrations plus élevées que sa moyenne présupposée, et deux plus faibles. Le papier de Callendar de 1938, présenté lors d'une réunion de la Royal Meteorological Society, fut critiqué par ses membres qui lui posèrent une douzaine de questions fondamentales (par exemple, la validité des estimations de concentrations moyennes de CO<sub>2</sub>, les connaissances élémentaires du cycle du CO<sub>2</sub> et les corrélations entre l'ensoleillement et la répartition des températures atmosphériques), questions qui, après un demi-siècle, sont toujours sans réponses et font toujours l'objet d'âpres débats (voir la référence 9).

A cause du manque de précision des mesures atmosphériques du XIX<sup>e</sup> siècle, on considère souvent — à tort — les études des gaz à effet de serre prisonniers dans les glaces des glaciers comme étant la source d'estimations la plus fiable en ce qui concerne les concentrations en CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub> (méthane) et N<sub>2</sub>O (oxyde d'azote) de l'ère préindustrielle. Les résultats d'analyse des échantillons de glace

sont supposés être « la seule possibilité de valider les modèles conçus pour décrire les changements climatiques à venir dus aux émissions anthropiques »<sup>10</sup>. Sur la base de ces analyses, le Groupement interministériel sur l'évolution du climat<sup>11</sup> (GIEC) déclara que la concentration préindustrielle en CO<sub>2</sub> était inférieure de 26% à la moyenne actuelle. Le GIEC a également déclaré que, par rapport aux valeurs actuelles, la concentration en N<sub>2</sub>O était de 19% moins élevée et que celle du CH<sub>4</sub> l'était de 215%. Toutefois, aucune étude n'a encore démontré que les traces de gaz à effet de serre dans les glaces anciennes, ou même que l'air interstitiel dans les neiges récentes, soient représentatifs de la composition atmosphérique.

## Les données des glaces ne sont pas fiables

Les données des échantillons des différents sites polaires ne sont pas cohérentes les unes avec les autres, elles sont en contradiction avec les évidences climatiques géologiques<sup>12</sup>. Un tel exemple nous est donné par les échantillons de l'Antarctique, ceux bien connus de Byrd et de Vostok. Une chute de la teneur en CO<sub>2</sub> est observée à la même profondeur de 500 mètres, mais l'âge de la glace diffère d'environ 16.000 ans. Pour l'échantillon de Byrd, une glace âgée de 14.000 ans, la concentration observée en CO<sub>2</sub> est faible : 50 ppmv,



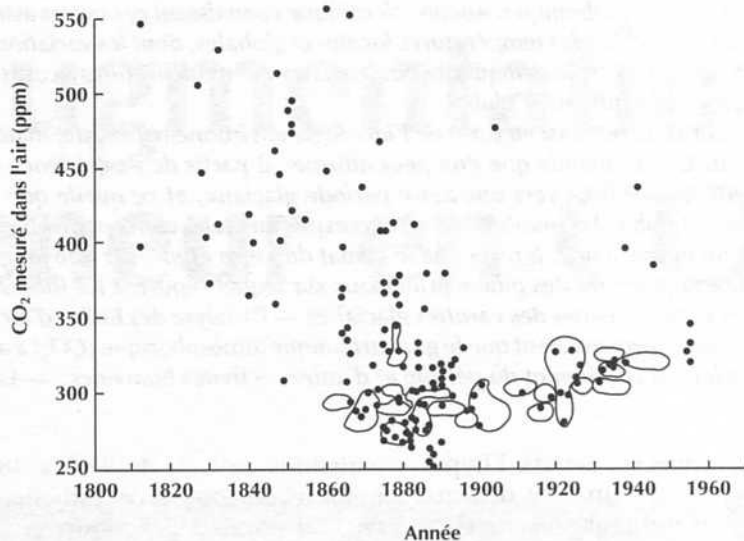
mais dans une glace de même âge à Vostok, on trouve plus de 60 ppmv. Dans une glace de 6000 ans au Camp Century au Groenland, la concentration des bulles d'air est de 420 ppmv en CO<sub>2</sub>, mais elle est de 270 ppmv dans une glace de même âge à Byrd en Antarctique.

H. Oeschger et al. ont tenté d'expliquer ces écarts par 1) « un processus qui n'a pas été identifié », 2) une modélisation erronée, 3) « des périodes qui ne se recouvrent pas », mais tout cela n'explique rien<sup>13</sup>. En se basant sur les relevés des glaces, il manque donc 30% de CO<sub>2</sub> produit par l'homme dans le cycle du CO<sub>2</sub>. Le fait que toute tentative d'explication ait échoué suggère que ces données ont été systématiquement biaisées<sup>14</sup>. Il n'est pas possible d'expliquer les relevés glaciaires à partir de la perturbation de processus invariables dans le temps, provoquée par les émissions de combustibles fossiles, la croissance biotique engendrée par le CO<sub>2</sub> supplémentaire et la déforestation<sup>15</sup>.

La datation d'événements climatiques majeurs, comme la détermination du Dryas récent par la dendrochronologie (l'examen des cercles des troncs d'arbre) et des sédiments lacustres, et celle basée sur les informations extraites des glaces du Groenland diffèrent avec des écarts pouvant atteindre 900 ans<sup>16</sup>. Les pics à court terme de variation isotopique δ<sup>18</sup>O dans les couches de glace ont été attribués au cycle annuel été-hiver des chutes de neige formées à des températures de l'air plus élevées et plus basses. Ces pics ont été utilisés pour dater l'âge des glaces. On suppose que ces accumulations dans les échantillons représentent la composition isotopique moyenne des précipitations et qu'elles sont maintenues dans un système clos<sup>17-18</sup>.

Les faits expérimentaux vont néanmoins à l'encontre de ces affirmations, notamment du fait des changements brutaux de température et de pression qui provoquent des métamorphoses brutales de la neige et de la glace dans les calottes glaciaires. Sur les sites très froids de l'Antarctique, les gradients de température peuvent atteindre 500°C/m, à cause de l'absorption du rayonnement solaire sous la surface<sup>19</sup>. La fonte de la neige sous la surface est courante en Antarctique là où la température estivale se situe en dessous de -20°C, formant ainsi des bassins d'eau à une

Fig. 1 - Concentrations moyennes du CO<sub>2</sub> atmosphérique mesurées aux XIX<sup>ème</sup> et XX<sup>ème</sup> siècles



Sur ce graphique, nous avons encerclé les valeurs que G.S. Callendar a utilisées. Il a rejeté les données élevées du XIX<sup>ème</sup> et les basses du XX<sup>ème</sup> siècle, pour parvenir à un résultat conforme à son hypothèse.

Source : Adapté de S. Fonseluis et al., 1956, *Tellus*, Vol 8 p 176.

profondeur d'environ 1 mètre de la surface<sup>12</sup>. D'autres mécanismes entraînent la présence d'eau liquide en profondeur dans la glace de l'Antarctique. C'est ainsi que l'on peut trouver des nappes aquifères s'étalant sur près de 8000 km<sup>2</sup> dans l'est de l'Antarctique et près de la station de Vostok, régions dont les températures se situent entre -4 et -26,2°C<sup>12</sup>. La recristallisation, la sublimation ainsi que la formation d'eau et de vapeur sous la surface perturbent la composition isotopique originale de la neige et de la glace (**Figure 2**).

Des modifications isotopiques importantes ont été trouvées expérimentalement dans le névé (neige partiellement compactée qui forme la couche de surface des glaciers) pourtant exposé à des gradients de température dix fois moindres<sup>19</sup>. De telles variations, qui peuvent selon l'ensoleillement devenir plusieurs fois par an, aboutissent à des estimations erronées de l'âge de la glace. C'est en partie dû au fait d'expliquer les variations isotopiques à court terme de l'oxygène et de l'hydrogène par l'alternance été-hiver, et de s'en servir comme données chronologi-

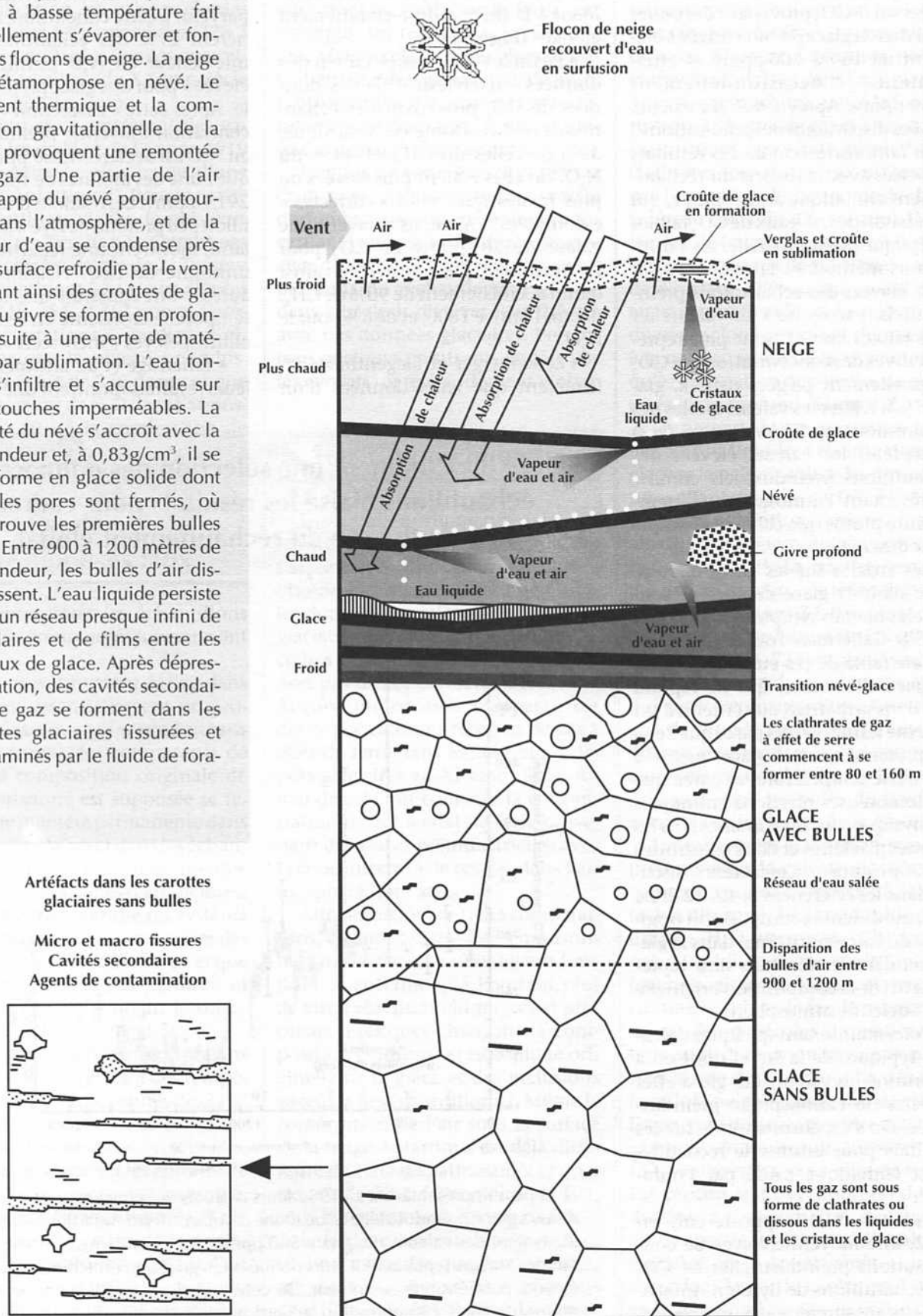
ques.

La validité de ce type de mesures des couches récentes de glaces fut mise à mal quand l'on découvrit six avions de chasse et deux bombardiers B 17 « Forteresse volante » de la Seconde Guerre mondiale, à environ 200 km d'un site d'étude classique à Dye-3 au Groenland, où ils durent faire un atterrissage en catastrophe en 1942. Les avions furent retrouvés 47 ans plus tard, à une profondeur de 78 mètres, alors que les glaciologues utilisant la datation isotopique de l'oxygène estimèrent qu'on les avaient trouvés à 12 mètres de profondeur<sup>20</sup>.

Dans le névé et dans les glaces des sommets du Groenland déposés ces derniers 200 ans, la concentration en CO<sub>2</sub> de l'air emprisonné varie entre 243,3 ppmv et 641,4 ppmv<sup>21</sup>. Un tel écart reflète des erreurs expérimentales dues à l'échantillonnage, ou bien à des phénomènes naturels dans la glace, plutôt qu'à des variations de CO<sub>2</sub> de l'atmosphère. Des écarts semblables sont observés dans d'autres études de gaz à effet de serre dans les glaces polaires (voir les références 12 et 22).

**Figure 2 - Processus se déroulant dans les calottes glaciaires**

L'absorption des rayons du soleil à basse température fait partiellement s'évaporer et fondre les flocons de neige. La neige se métamorphose en névé. Le gradient thermique et la compression gravitationnelle de la neige provoquent une remontée des gaz. Une partie de l'air s'échappe dans l'atmosphère, et de la vapeur d'eau se condense près de la surface refroidie par le vent, formant ainsi des croûtes de glace. Du givre se forme en profondeur suite à une perte de matériau par sublimation. L'eau fondue s'infiltré et s'accumule sur des couches imperméables. La densité du névé s'accroît avec la profondeur et, à  $0,83\text{g/cm}^3$ , il se transforme en glace solide dont tous les pores sont fermés, où l'on trouve les premières bulles d'air. Entre 900 à 1200 mètres de profondeur, les bulles d'air disparaissent. L'eau liquide persiste dans un réseau presque infini de capillaires et de films entre les cristaux de glace. Après dépressurisation, des cavités secondaires de gaz se forment dans les carottes glaciaires fissurées et contaminés par le fluide de forage.



## Piper les données sur le CO<sub>2</sub>

Jusqu'en 1985, les données publiées sur le CO<sub>2</sub> provenant des bulles d'air dans la glace préindustrielle s'étaient de 160 à 700 ppmv et atteignaient occasionnellement 2450 ppmv. Après 1985, les valeurs élevées disparurent des publications ! Pour faire correspondre ces résultats dispersés avec la théorie du réchauffement climatique anthropique, qui nécessitait des niveaux de CO<sub>2</sub> faibles à l'époque préindustrielle, on a utilisé trois méthodes : 1) rejeter les valeurs élevées des échantillons préindustriels, parce que « les valeurs les plus faibles en CO<sub>2</sub> sont plus représentatives des concentrations de CO<sub>2</sub> originellement piégées dans la glace »<sup>23</sup>, 2) rejeter les valeurs faibles des échantillons du XX<sup>ème</sup> siècle, et 3) interpréter les valeurs élevées des échantillons préindustriels comme représentant l'atmosphère contemporaine plutôt que celle de l'époque préindustrielle.

Les articles sur les gaz à effet de serre dans la glace colportent souvent les mêmes symptômes que ceux de G.S. Callendar. Toutefois, la plus grande faille de ces études concerne la glace elle-même, qui ne répond pas, dans sa matrice, aux critères d'un système fermé. Et ceci parce que l'eau est présente dans la glace, même à très basse température, et parce que de nombreuses réactions chimiques et physiques ont lieu, *in situ*, dans les calottes glaciaires et dans les carottes qu'on y récupère. Ces facteurs, discutés dans les références 8, 12, 22 et 24 à 28, modifient la composition originelle de l'air emprisonné dans la glace, rendant les résultats non représentatifs de la composition originelle de l'ancienne atmosphère.

Voici maintenant quelques exemples typiques de la façon dont on a déterminé les valeurs des gaz à effet de serre de l'atmosphère préindustrielle. On s'est ensuite fondé sur ces résultats pour estimer le réchauffement climatique causé par l'homme<sup>11</sup>.

- Neftel et al. rapportèrent, en 1982, une moyenne élevée de concentrations préindustrielles de CO<sub>2</sub> des échantillons de Byrd en Antartique. Ils mesurèrent des concentrations de 330 à 415 ppmv, avec un maximum à 500 ppmv<sup>23</sup>. Toutefois,

en 1988, dans la seconde édition de ces mesures expérimentales, Neftel et al. firent disparaître ces valeurs élevées ; la concentration la plus élevée y est de 290 ppmv, conformément à la théorie du réchauffement global<sup>29</sup> (Figure 3).

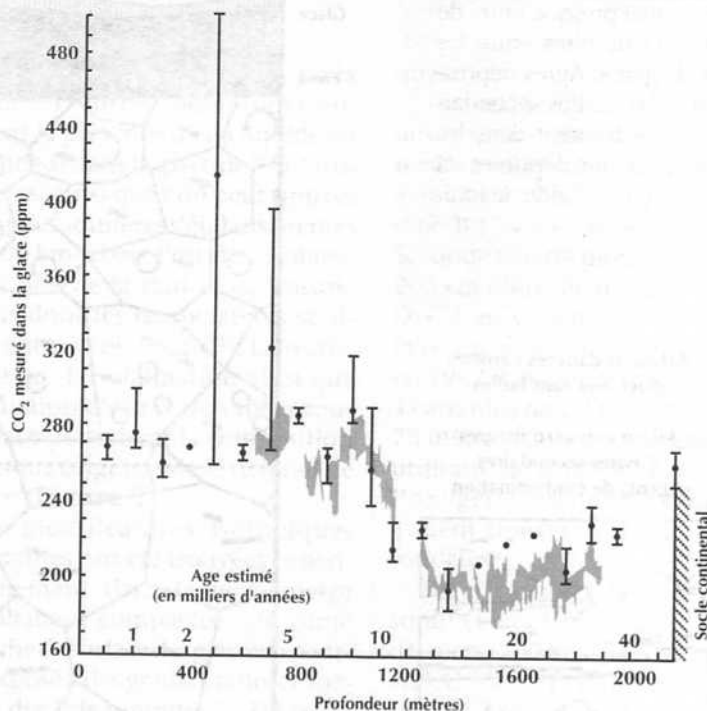
- Pearman et al. « sur examen des données » rejetèrent 43% des données du CO<sub>2</sub> provenant des échantillons de Law Dome en Antartique, 39% de celles du CH<sub>4</sub>, et 43 % du N<sub>2</sub>O, car elles étaient plus élevées ou plus faibles que celles « correctes » escomptées<sup>30</sup>. Ainsi, ils trouvent une valeur de 281 ppmv de CO<sub>2</sub> pour l'atmosphère préindustrielle, ainsi qu'un accroissement de 90% de CH<sub>4</sub>, depuis l'année 1600, et de 8% pour le N<sub>2</sub>O.

- Leuenberger et Siegenthaler affirmèrent que leurs données d'un

échantillon de glace du Groenland démontrent que le niveau actuel de N<sub>2</sub>O atmosphérique à 310 ppmv, est dû à un accroissement récent de 19% causé par l'activité industrielle<sup>31</sup>. Pour parvenir à cette conclusion, ils éliminèrent 27% des échantillons avec une teneur en N<sub>2</sub>O estimée « trop élevée » pour une glace préindustrielle. Après cette « correction », la concentration moyenne préindustrielle en N<sub>2</sub>O est déclarée à 260 ppmv, bien que l'une des mesures de 1822 soit de 291,1 ppmv. Les résultats d'un échantillon peu profond de Dye 3 au Groenland, montrent une répartition non uniforme de N<sub>2</sub>O. Néanmoins, les auteurs ont construit une tendance temporelle croissante en rejetant les chiffres élevés « incorrects ».

- Etheridge et al. affirmèrent que leurs résultats montrent une concen-

Figure 3 - Comment une sélection des données des échantillons biaise les résultats pour cadrer avec la théorie du réchauffement global



Lorsqu'ils présentèrent en 1982 leurs mesures des concentrations de CO<sub>2</sub> dans la glace préindustrielle issue d'une carotte de Byrd Antartique, Neftel et al. avaient des valeurs atteignant 500 ppmv (points et barres). En 1988, les mêmes auteurs republièrent leurs données (en grisé), en omettant les valeurs élevées publiées précédemment. De cette manière, la concentration maximum atteignait 290 ppmv, en accord avec la théorie du réchauffement global.



tration en  $N_2O$  dans la glace préindustrielle de 285 ppmv<sup>32</sup>. Cette valeur fut obtenue après avoir rejeté 44% de leurs mesures ! Des analyses restantes, furent également rejetées sans explication les valeurs élevées des XVIème et XVIIème siècles (328,3 et 329,8 ppmv), plus élevées que celles des échantillons du XXème siècle (285,7 et 322,9 ppmv).

• Zardini et al. rejetèrent des valeurs faibles de  $N_2O$  de l'année 1919 dans la partie la plus jeune d'une glace de l'Antarctique<sup>33</sup>. Pour la partie de l'échantillon vieille de plusieurs milliers d'années, ils ne rejettent pas une valeur assez faible de 217 ppmv mais ils éliminent les valeurs élevées comme 310, 354, et 362 ppmv. Après ces « améliorations », Zardini et al. concluent que le niveau préindustriel en  $N_2O$  est de 270 ppmv et que l'accroissement de  $N_2O$  dans l'atmosphère est dû « à la combustion de carburant fossile ».

## Quelques présumés faux

Pour interpréter les échantillons de glace, les présumés suivants sont utilisés :

1) L'emprisonnement de l'air dans la glace est essentiellement un processus mécanique qui se produit sans fractionnement des composants de l'air<sup>34</sup> ; la composition originale de l'air emprisonné est supposée se retrouver de manière permanente dans les calottes polaires et dans les échantillons récupérés. Cela veut dire que la glace, avec ses bulles d'air incluses, va se comporter comme un système fermé pendant des dizaines voire des centaines de milliers d'années, et que ce système ne sera pas perturbé ni lors du forage, ni pendant le transport, ni lors de son stockage.

2) Il n'y a pas de phase liquide dans le névé ni dans la glace à des températures annuelles moyennes de  $-24^{\circ}C$  ou moins<sup>35</sup>.

3) Les inclusions gazeuses sont plus jeunes que la glace qui les entoure de 80 à 2800 ans (voir, par exemple, référence 36). Ce présumé est nécessaire pour les échantillons de glace de faible profondeur, dont l'air emprisonné — dans les glaces du XIXème siècle ou plus tôt — présente des valeurs en  $CO_2$ ,  $CH_4$  et  $N_2O$  semblables aux concentrations atmos-

phériques actuelles.

Il a été montré que ces présupposés étaient incorrects, et donc que les conclusions portant sur les faibles valeurs des concentrations en gaz à effet de serre sont fausses (voir, par exemple, les références 12, 22, 24-28). Malgré cela, les glaciologues travaillant sur les gaz à effet de serre n'offrirent pas d'arguments pour réfuter ces critiques dans le seul et unique article qu'elles suscitèrent<sup>37</sup>.

En plus de cette sélection biaisée de données expérimentales, il existe de nombreux aspects techniques concernant l'analyse scientifique des glaciers qui semblent être ignorés par les partisans du réchauffement global, dans leur désir d'étayer leur théorie avec des données glaciaires. Présentons quelques points mis de côté par les avocats du réchauffement global.

## Séparation chimique

Un argument choquant, pour prétendre à une augmentation du  $CO_2$ ,  $CH_4$  et  $N_2O$  atmosphérique due à l'homme, consiste à dire que toutes les données fournies par les carottes glaciaires proviennent de dépôts glaciaires formés au XIXème siècle, et non pas de ces dernières décennies. Aucune information n'apparaît sur des concentrations récentes de gaz à effet de serre dans le névé et les dépôts glaciaires au XXème siècle. Au lieu de cela, on compare la concentration de gaz à effet de serre provenant des glaces préindustrielles avec la concentration de ces gaz dans l'atmosphère libre actuelle<sup>12</sup>.

Afin de justifier de telles comparaisons, on suppose que l'air emprisonné dans la glace ne subit aucun fractionnement chimique. Pourtant, plus de vingt réactions chimiques et processus physiques changent la composition chimique et isotopique originelle de la glace et des inclusions gazeuses des échantillons<sup>12</sup>. Même la composition de l'air sous la surface de la neige Antarctique est déjà différente de celle de l'atmosphère ; on a trouvé de 20 à 50% moins de  $CO_2$  sous la surface (voir référence 12).

Le fractionnement chimique et isotopique a lieu dès que l'air est enfermé dans les flocons de neige, puis dans l'air interstitiel près de la surface (effet d'insolation), et il se prolonge jusqu'au profond du névé et au cœur

de la glace. Dans les couches de neige superficielle et du névé, le fractionnement s'effectue sur une échelle de jours et de quelques années ; cependant, au plus profond du glacier, c'est en centaines de milliers d'années qu'il faut compter. Ce fractionnement est dû à des différences de solubilité des composants de l'air dans l'eau glacée, à des réactions chimiques, à la formation de clathrates de gaz et à des effets thermiques gravitationnels<sup>12</sup> (les clathrates sont des composés formés par l'inclusion d'une molécule dans le réseau cristallin d'une autre). Dans le névé, le fractionnement est dû à la fonte des cristaux de glace en dessous de la surface, à l'évaporation de l'eau, au transport de celle-ci dans les pores du névé selon le gradient thermique, à la condensation de la vapeur ainsi qu'à la formation de couches de glace et de givre profond (Figure 2).

La plupart de ces processus sont liés à l'eau liquide, présente dans la glace et la neige froide à des températures allant jusqu'à  $-73^{\circ}C$ <sup>38</sup>, à la pression et aux variations de température ainsi qu'aux métamorphoses des cristaux de neige<sup>12</sup>. Le fractionnement des gaz, en fonction de leur solubilité dans l'eau ( $CH_4$  est 2,8 fois plus soluble que  $N_2$  dans l'eau à  $0^{\circ}C$  ;  $N_2O$  55 fois plus et  $CO_2$  73 fois plus), s'opère dès la formation des flocons de neige, qui sont recouverts d'une fine couche de liquide surrefroidi<sup>22</sup>. Les gaz dissous les premiers dans l'eau sont alors mis en équilibre avec l'air emprisonné dans les pores du névé et avec les petites bulles de la glace.

Les carbonates et autres impuretés présents dans la calotte glaciaire — comme les produits très réactifs  $HNO_3$  (acide nitrique),  $HCl$  (acide chlorhydrique),  $H_2O_2$  (peroxyde d'hydrogène),  $SO_2$  (dioxyde de soufre) et  $O_3$  (ozone), ainsi que des catalyseurs comme le cuivre, le fer, le manganèse, ou des particules de matière — tous sont dissous ou maintenus en suspension dans les liquides à la surface de la neige et des grains de glace. Ils peuvent donc réagir entre eux (par exemple, produire ou absorber du  $CO_2$ ), ou avec les gaz à effet de serre. Les processus d'oxydation ou de réduction ne se font pas seulement dans la partie supérieure de la calotte glaciaire où le Soleil pénètre, mais aussi dans la partie la plus profonde et la plus sombre. On le voit par la brusque disparition des traces de  $H_2O_2$  au plus profond de la calotte glaciaire.

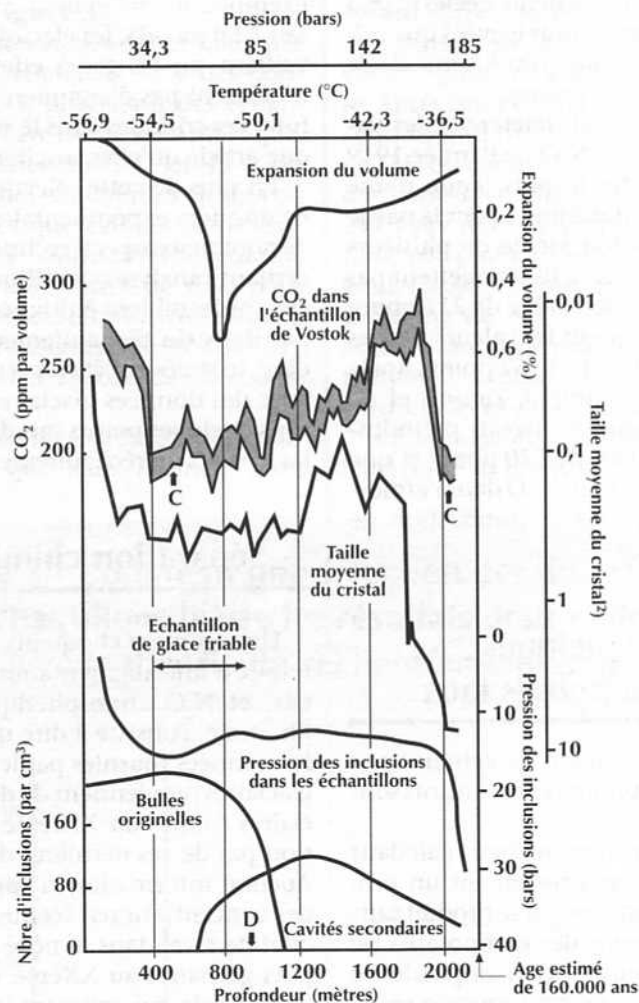
re, ainsi que par sa décroissance continue selon la profondeur (Voir référence 22).

Un autre processus important est la formation différentielle et la dissociation de clathrates purs et mixtes (hydrates) des gaz à effet de serre et des composants principaux de l'air. Les pressions de dissociation sont bien plus faibles pour les gaz à effet de serre que pour l'oxygène et l'azote. A  $-20^{\circ}\text{C}$ , ces pressions sont de 4 bars pour le  $\text{N}_2\text{O}$ , 5 bars pour le  $\text{CO}_2$  et de 13,5 bars pour le  $\text{CH}_4$ ; à comparer aux 120 bars pour le  $\text{N}_2$  et 160 bars pour l' $\text{O}_2$ . Dans la glace à  $-20^{\circ}\text{C}$ , le  $\text{CO}_2$  passe de la phase gazeuse à celle de clathrate (solide blanc découvert en 1882 par Zygmunt F. Wróblewski, le premier physicien à réussir la liquéfaction de l'air<sup>39-40</sup>), pour enfin disparaître du gaz des bulles d'air à une profondeur approximative de 70 mètres, où la pression monte à 5 bars.

D'un autre côté, l' $\text{O}_2$  et le  $\text{N}_2$  se transforment en cristaux de clathrate à des profondeurs plus conséquentes de 900 à 1200 mètres, où tous les gaz vont finalement prendre la forme de clathrate ou bien se dissoudre dans les cristaux de glace. Ainsi, à cette profondeur, il ne reste plus de trace des bulles d'air. Toutefois, lorsqu'on remonte des échantillons, les cristaux de clathrate se dissolvent à une pression plus basse dans la glace originellement dépourvue de bulles, formant ainsi artificiellement de nouvelles cavités de gaz (Figure 2). Ce phénomène fondamental est soit minimisé (voir, par exemple, référence 41), soit ignoré dans les publications sur les gaz à effet de serre.

On a montré expérimentalement que la pression résiduelle du gaz n'est pas un facteur déterminant en ce qui concerne la pression de dissociation des clathrates, qui se trouvent enrichis d'éléments qui forment aisément les clathrates. Par opposition, la phase sans gaz se trouve enrichie d'éléments qui ne forment que difficilement des clathrates<sup>42</sup>. L'apparition des clathrates sont la cause de la disparition des gaz à effet de serre en deux étapes : 1) pendant la formation des clathrates dans la calotte glaciaire, quand les gaz à effet de serre sont absorbés dans les clathrates plus tôt que le  $\text{N}_2$  et l' $\text{O}_2$ ; et 2) lors de la dépressurisation de la carotte de glace, quand les clathrates de  $\text{N}_2$  et d' $\text{O}_2$  se dissolvent bien avant les gaz à effet

Figure 4 - Origine des contaminations des échantillons



On voit ici les nombreux processus qui influencent la composition chimique et isotopique des inclusions d'air dans les couches de glace et les échantillons, d'après les données des bases de Vostok et de Byrd, dans l'Antarctique. La flèche D (en bas) indique la totale disparition des bulles d'air dans l'échantillon de Vostok. Les flèches C (milieu gauche et droite) indiquent les endroits où la contamination des échantillons de Vostok par le plomb, le zinc, l'aluminium et le sodium du fluide de forage a été la plus importante.

Source : adapté de Jaworowski et al., 1992.

de serre, formant ainsi dans la glace des cavités de gaz secondaires.

Ce dernier phénomène est associé avec l'apparition de micro explosions qui changent la structure de l'échantillon<sup>43</sup> (Figure 2), et la formation de micro et de macro fissures aboutissant, avec les fissurations de la glace dues à la tension, au fractionnement moléculaire et isotopique des gaz<sup>44</sup>.

Comme nous l'avons mentionné

précédemment, on a trouvé des concentrations de gaz à effet de serre dans les glaces préindustrielles aussi grandes, voire plus grandes, que celles de l'atmosphère contemporaine. Dans certaines inclusions gazeuses, on a mesuré des variations de 50 ppmv de  $\text{CO}_2$  à seulement 2,5 cm de distance<sup>45</sup>. Cette répartition non uniforme de  $\text{CO}_2$  ne reflète évidemment pas des modifications dans la



composition de l'atmosphère mais correspond au caractère aléatoire du fractionnement.

De toute façon, comme indiqué en références 12 et 22, l'effet prépondérant en ce qui concerne le fractionnement gazeux reste la disparition en priorité des gaz à effet de serre dans les bulles d'air et les cavités gazeuses secondaires. Pour cette raison, la plupart des échantillons de gaz recueillis à partir des glaces polaires donnent des chiffres bien plus faibles que ceux de l'atmosphère actuelle, et ceci même pour une glace datant d'une période où la température générale était de 0,5 à 1,3°C plus élevée qu'aujourd'hui — par exemple, pendant la période interglaciaire de l'Eemien, il y a 125.000 à 130.000 ans ; à la moitié de l'Holocène, il y a 5000 à 6000 ans ; ou pendant la période chaude médiévale, il y a 1200 ans<sup>11</sup>.

Les concentrations en CO<sub>2</sub> des bulles d'air des années 1000 à 1800 restent remarquablement stables : 270 à 290 ppmv, malgré un petit âge

glaciaire entre les XVIème et XIXème siècles, où la température chuta de 1°C en moyenne. Une telle chute de la température globale aurait dû se traduire par une baisse des concentrations en CO<sub>2</sub> contenu dans l'atmosphère, du fait d'une solubilité accrue du CO<sub>2</sub> dans une eau océane plus froide, et par une diminution des processus d'oxydation sur terre et en mer (voir plus loin).

L'absence de ces réactions dans les bulles d'air emprisonnées dans la glace a semblé « surprenante » pour les auteurs du rapport de 1990 du GIEC, qui en ont déduit qu'à de telles variations climatiques, la sensibilité du CO<sub>2</sub> atmosphérique est faible. Pourtant, la teneur en CO<sub>2</sub> atmosphérique est très sensible, même à des changements de température globale faibles et à court terme, comme nous allons le voir plus loin. Les changements à long terme dans la concentration des gaz à effet de serre dans les inclusions gazeuses des calottes glaciaires reflètent probable-

ment davantage l'effet cumulatif de l'interaction de nombreux processus se déroulant dans la glace et dans les échantillons recueillis que la composition de l'atmosphère ancienne (**Figure 4**).

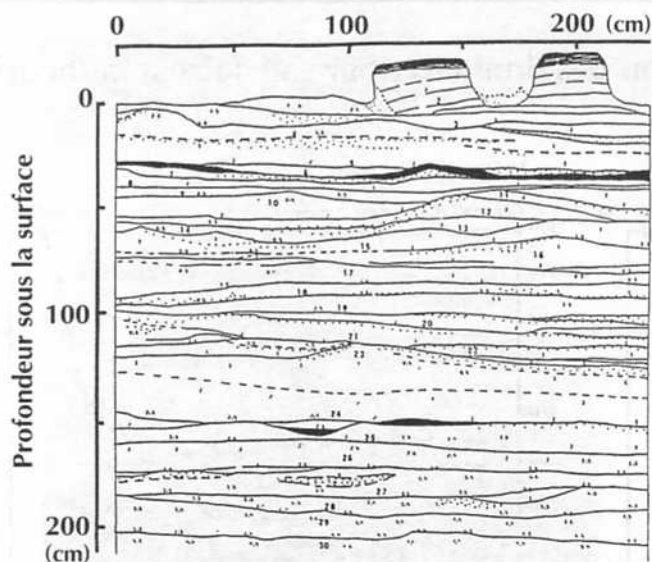
## L'âge de l'air dans les bulles

On émit l'hypothèse ad hoc suivant laquelle l'air des bulles emprisonnées dans la glace est de 90 à 200 ans plus jeune que la glace qui l'entoure, quand on trouva des concentrations de gaz à effet de serre dans de la glace du XVIIIème et du XIXème siècle équivalant à celles de l'atmosphère actuelle<sup>46-47</sup>.

Aucune preuve expérimentale ne vint étayer cette affirmation. Au lieu de cela, Craig et al. offrirent un argument d'évidence logique : l'hypothèse est juste puisqu'en corrigeant les âges de cette manière, on « aboutit assez précisément aux mesures de l'atmosphère récente »<sup>47</sup>. Plus tard, on précisa la différence entre l'âge de l'air des bulles et celui de la glace, sur une base théorique et non pas expérimentale, avec des variations estimées entre 90 et 2800 ans selon les sites polaires<sup>36</sup>. Ces estimations furent simplement établies à partir de l'âge de transition entre le névé et la glace. On supposa que sur les sites du Groenland et de l'Antarctique, où les températures moyennes sont inférieures à -24°C, il n'y avait pas une seule couche de glace imperméable à l'atmosphère dans toute la colonne de névé. En plus, on pensait que cet air pouvait librement pénétrer dans la glace, et ce jusqu'à la zone de transition entre le névé et la glace à environ 40 à 120 mètres de profondeur, endroit où se forme l'occlusion définitive des pores du névé.

Toutefois, la formation de croûtes de glace (voir référence 12) a été observée sur de nombreux sites dont la température moyenne de surface atteint -57°C. De nombreuses études stratigraphiques japonaises, russes et norvégiennes ont démontré qu'une densité aussi élevée de strates (couches) de glace est la norme en Antarctique, où elles forment une structure multi-couche (1 à 15 strates par mètre) isolant le névé dans des poches horizontales (**Figure 5**). Cette structure agit comme une barrière empê-

**Figure 5 - La structure multi-couche de glace empêche la pénétration de l'air dans le névé**



La croûte de glace montre clairement qu'une grande densité de strates de glace forme une structure multi-couche qui isole le névé en poches horizontales, empêchant ainsi l'air de pénétrer. Aussi, l'hypothèse que l'air et la glace mitoyenne aient des âges différents, utilisée pour asseoir la théorie du réchauffement global, est incorrecte. On voit ici une stratigraphie de névé dans une crevasse du plateau de Mizuho (Antarctique Est), où les températures moyennes sont de -51°C. Les lignes pleines indiquent les croûtes de glace.

Source : adapté de Watanabe, 1977.



chant la pénétration de l'air dans le névé. Le fractionnement chimique et isotopique de  $\text{CO}_2$ ,  $\text{CH}_4$ ,  $\text{N}_2$  et  $\text{O}_2$  au sein de l'air emprisonné dans le névé poreux du Groenland indique que cet air du névé est isolé de l'atmosphère<sup>47</sup>. Sur cette base, Craig et al. rejetèrent leur première hypothèse concernant la différence d'âge entre les bulles d'air et la glace<sup>48</sup>.

Treize ans après que cette hypothèse sur l'âge fut émise, et acceptée sur l'idée que la teneur en gaz à effet de serre était moindre dans l'atmosphère préindustrielle, on tenta une expérience à Summit, au Groenland, pour la valider<sup>21</sup>. Sur ce site, les auteurs estiment la différence air-glace à 210 ans. Comme indiqué en référence 22, l'interprétation des résultats expérimentaux ignore la loi de Darcy sur les échanges dans les milieux poreux. La concentration en  $\text{CO}_2$  dans l'air d'un névé de 214 ans variait de 242,3 à 435,7 ppmv et dans un névé de 50 ans, de 347 à 641,4 ppmv. De telles concentrations ne représentent pas la composition atmosphérique. Elles sont plutôt le résultat de processus de fractionnement dans les calottes glaciaires et d'erreurs expérimentales.

La conséquence du présupposé que l'air emprisonné dans les glaces est

plus jeune que la glace environnante peut être appréciée sur la **figure 6b**, celle-ci étant généralement considérée comme « la preuve » que le niveau de  $\text{CO}_2$  atmosphérique a crû à cause de l'activité humaine<sup>11</sup>. Le même procédé erroné fut utilisé pour les autres gaz à effet de serre. En ce qui concerne le  $\text{CO}_2$ , les données provenant de glace du XIXème siècle à Siple (Antarctique) ont été exactement ajustées aux concentrations de  $\text{CO}_2$  atmosphérique actuelles mesurées près du volcan en activité Mauna Loa (Hawaï) et émetteur de  $\text{CO}_2$  — en supposant arbitrairement que l'air enfermé est 83 ans plus jeune que la glace.

Sans cette « correction » et en prenant l'âge réel de la glace, les courbes de Siple et de Mauna Loa *ne correspondent pas* et pourraient indiquer que les concentrations en  $\text{CO}_2$  atmosphérique sont les mêmes pour la fin du XIXème siècle que celles des années 70. On peut aussi noter que la concentration en  $\text{CO}_2$  des bulles d'air décroît avec la profondeur de la glace pour la période entre 1891 et 1661, non pas à cause d'un quelconque changement dans l'atmosphère mais plutôt à cause de l'accroissement du gradient de pression, (conséquence probable de la formation de clathra-

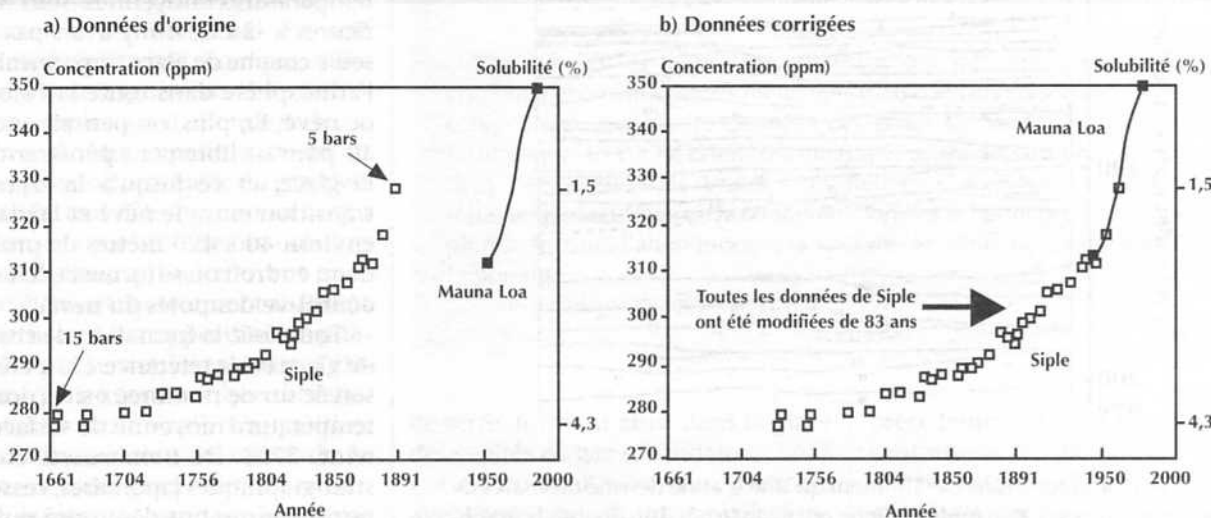
te) et de la plus grande solubilité du  $\text{CO}_2$  avec la profondeur<sup>12</sup>.

## Contamination et fissuration des échantillons

Un autre domaine trop souvent ignoré par les partisans du réchauffement global concerne les conditions de récupération des échantillons. Le carottage par forage est brutal, soumettant la glace à des tensions mécaniques et thermiques, à une décompression éprouvante et à la pollution. Ces facteurs provoquent des micro et macro fissures dans la glace, faisant éclater les bulles d'air originelles et formant artificiellement des cavités secondaires dans une glace profonde dépourvue de bulles. Ceci provoque une contamination interne des carottes de glace.

Un réseau dense de fractures horizontales est créé dans la glace par un effet de foliation qui se produit lors de la décompression d'échantillons de plus de 8 bars, c'est-à-dire provenant de profondeurs de plus de 110 mètres. La fissuration se produit lors du forage et du transport de la

Figure 6 - Exemple de correction des données pour satisfaire à la théorie



On voit ici les mesures du  $\text{CO}_2$  dans la glace préindustrielle (carrés), et le  $\text{CO}_2$  atmosphérique à Mauna Loa à Hawaï (ligne). Les données originales sont en (a). Les mêmes données apparaissent en (b) après une "correction" arbitraire de 83 ans de l'âge de l'air pour faire correspondre les chiffres à la théorie du réchauffement global. Les données initiales indiqueraient que les concentrations de  $\text{CO}_2$  de la fin du XIXème siècle seraient semblables à celles de 1970. Les valeurs corrigées furent publiées par Neftel et al., 1985 ; Friedli et al., 1986 ; et le GIEC, 1990.

carotte hors du puits, ces derniers étant remplis de liquide de forage indispensable afin de compenser la pression des parois. Ces fissurations sont rapidement cicatrisées mais il en reste des traces sous forme de stratification horizontale des échantillons. Un tel phénomène, bien connu des géologues et des glaciologues, est bien visible sur la **figure 7**. Des fractures semblables sont visibles sur les photos de l'échantillon de Vostok<sup>49</sup>.

Les fluides de forage (gasoil, kérosène, etc., auxquels on ajoute divers fluides organiques afin de réguler la densité et de jouer le rôle d'antigel) pénètrent ces fractures jusqu'au cœur des échantillons, dans les bulles et

dans les infractuosités formées lors de la dissociation des clathrates. Les articles habituellement référencés pour les gaz à effet de serre n'informent pas le lecteur au sujet des méthodes ou des fluides de forage (voir, par exemple, référence 50). Les gaz qui se libèrent lors de la décomposition des clathrates peuvent s'échapper dans le fluide de forage avant que les fissurations de l'échantillon ne parviennent à se refermer. Comme le suggèrent Craig et al., le fractionnement moléculaire et isotopique peut avoir lieu pendant le carottage<sup>48</sup>.

De nombreuses études sur la présence des métaux dans les échantillons montrent (voir, par exemple,

référence 51) une contamination excessive interne par les métaux du fluide de forage. Dans ces échantillons d'Antartique, les concentrations en zinc et plomb furent supérieures des dizaines et des centaines de milliers de fois à la concentration de la neige de surface actuelle (**Figure 8**). Cela suffit à démontrer que les échantillons de glace ne sont pas un système clos ; les métaux lourds du fluide de forage pénètrent l'échantillon via les micro et macro fissures pendant le forage et le transport.

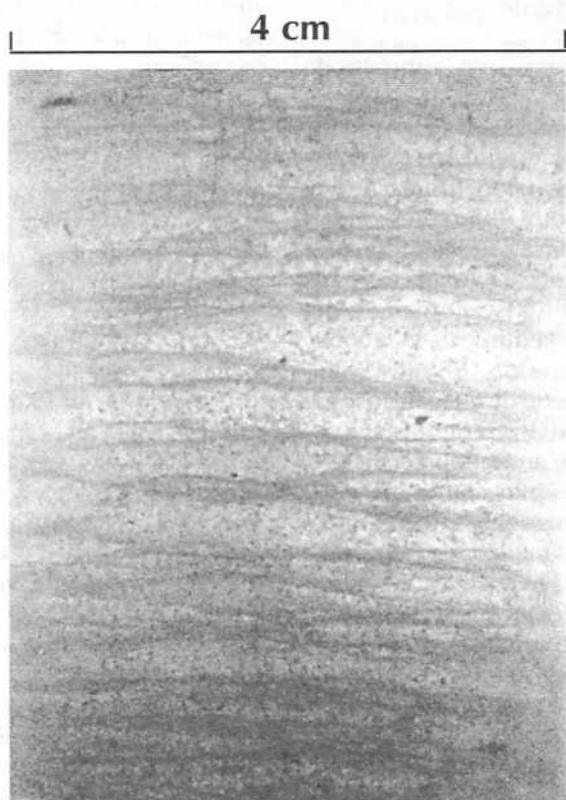
Lors du forage, l'échantillon devient poreux et susceptible de permettre l'échange de gaz et de liquides. La stratification et vingt autres phénomènes physiques et chimiques rendent inadéquate l'utilisation de bulles de gaz emprisonnées dans la glace pour estimer les concentrations de gaz à effet de serre de l'atmosphère ancienne<sup>12</sup>.

Il est étonnant de voir à quel point la communauté scientifique et la population ont accepté de manière crédule de si mauvaises interprétations de l'étude des glaciers visant à prouver le caractère anthropique de l'accroissement des gaz à effet de serre dans l'atmosphère. Les futurs historiens pourront se servir de cet exemple pour montrer comment la politique peut avoir une influence négative sur la science.

### L'utilisation des isotopes du carbone

L'analyse des glaciers n'est pas le seul moyen pour estimer la contribution de l'homme dans la teneur en CO<sub>2</sub> de l'air. Le carbone présent dans le CO<sub>2</sub> est constitué de deux isotopes stables, le carbone-12 et le carbone-13. Leur proportion relative s'exprime par  $\delta^{13}\text{C}$  (delta carbone-13, qui exprime le rapport  $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$  en valeur relative par rapport à un standard pris dans un échantillon de fossiles carbonatés, correspondant à peu près à la moyenne des calcaires sédimentaires. On utilise une mesure relative pour deux raisons : d'abord la notation est plus simple; ensuite, il est beaucoup plus facile de mesurer une valeur relative de rapport isotopique qu'une valeur absolue. Le signe négatif retrouvé dans les valeurs ci-après signifie que le rapport isotopique est inférieur à celui du standard. NdIR).

**Figure 7 - Fissures dans les échantillons de glace lors du forage et de leur remontée**



On voit sur cette microphotographie en transmission le cœur d'un échantillon du plateau de Mizuho (Antartique Est), à la profondeur de 356 mètres. Notez la grande densité de macro fissures "cicatrisées", qui ne perturbent pas l'intégrité mécanique de l'échantillon. Avant leur "cicatrisation", les fissures permettent la circulation des gaz et de polluants, affectant ainsi les mesures des gaz à effet de serre.



La valeur de  $\delta^{13}\text{C}$  diffère selon les différents composés de la nature. Dans le carbone minéral, il est de  $-7\text{‰}$ <sup>52</sup>; pour le  $\text{CO}_2$  atmosphérique en équilibre isotopique avec les ions marins  $\text{HCO}_3^-$  et  $\text{CaCO}_3$  (carbonate de calcium), on l'estime à  $-7\text{‰}$ <sup>53</sup>; les mesures atmosphériques de 1956 étaient de  $-7,00\text{‰}$ <sup>54</sup> et de  $-7,807\text{‰}$  en 1988<sup>55</sup>; et pour le carbone biologique et des combustibles fossiles, il est de  $-26\text{‰}$ <sup>56</sup>. Des différences aussi importantes entre la signature isotopique du carbone biogénique et celle des combustibles fossiles permettent d'estimer leurs apports respectifs, présents et passés, dans l'atmosphère. En effet, mélanger des quantités de  $\text{CO}_2$ , même faibles, avec un si faible  $\delta^{13}\text{C}$ , doit changer nettement le  $\delta^{13}\text{C}$  moyen naturel du  $\text{CO}_2$  atmosphérique.

Cette estimation peut être faite par des calculs de masse isotopique du carbone. Par exemple, entre 1956 et 1988, la concentration atmosphérique en  $\text{CO}_2$  a varié de 315,6 ppmv à 351,2 ppmv<sup>7</sup>, soit une hausse de 10,14%. Si ce changement était uniquement dû à des émissions anthropiques ayant un  $\delta^{13}\text{C}$  de  $-26\text{‰}$  en 1956, le  $\delta^{13}\text{C}$  de 1988 devrait être de :  $(-7\text{‰} \cdot 0,8989) + (-26\text{‰} \cdot 0,1014) = -8,927\text{‰}$

et non les  $-7,807\text{‰}$  mesurés par Keeling et al. à Maura Loa, Hawaï<sup>55</sup>. En prenant les 21% de croissance du  $\text{CO}_2$  atmosphérique dus à l'activité de l'homme d'après les dires du GIEC sur la base des études glaciaires<sup>11</sup>, et avec une valeur du  $\delta^{13}\text{C}$  préindustriel de  $-7\text{‰}$ , son niveau actuel atmosphérique devrait être tombé à  $-11\text{‰}$ . Jamais personne n'a mesuré une valeur aussi basse.

De tels chiffres sont en contradiction avec l'hypothèse du réchauffement par effet de serre, notamment à cause de l'estimation exagérément longue que le GIEC donne pour la durée de vie du  $\text{CO}_2$  dans l'atmosphère (200 ans)<sup>11</sup>. C'est sur ces données que le GIEC, à partir de l'émission annuelle plutôt faible de 6 gigatonnes de carbone (GtC), due à l'augmentation de la consommation des combustibles fossiles et à une utilisation accrue des terres, s'est basé pour estimer un accroissement de 150 GtC atmosphériques entre 1869 et 1990. Le  $\delta^{13}\text{C}$  mesuré en 1988, bien plus élevé que les résultats des calculs d'équilibre de masse isotopique, suggère que l'homme ne contribua que très marginalement au  $\text{CO}_2$  atmos-

phérique cette année-là. La partie correspondant aux émissions anthropiques peut être estimée de la façon suivante<sup>57</sup>.

En 1991, l'auteur et Tom V. Segalstad, de l'université d'Oslo, ont calculé la composition isotopique de la teneur totale en  $\text{CO}_2$  atmosphérique de décembre 1988 sur la base des 748 GtC indiquées par le GIEC en 1990, lorsque Keeling et al. (1989) mesurèrent un  $\delta^{13}\text{C}$  de  $-7,807\text{‰}$ . Nous avons effectué ces calculs pour trois composants de la teneur en  $\text{CO}_2$  : 1) la part de  $\text{CO}_2$  naturel restant de l'époque préindustrielle (avant 1750) dotée d'un  $\delta^{13}\text{C}$  de  $-7\text{‰}$ ; 2) la part de  $\text{CO}_2$  naturel avec un  $\delta^{13}\text{C}$  de  $-7\text{‰}$  restant de la période 1750-1988; et 3) la part de  $\text{CO}_2$  provenant des émissions annuelles de combustibles fossiles de 1860 à 1988, avec un  $\delta^{13}\text{C}$  de  $-26\text{‰}$ .

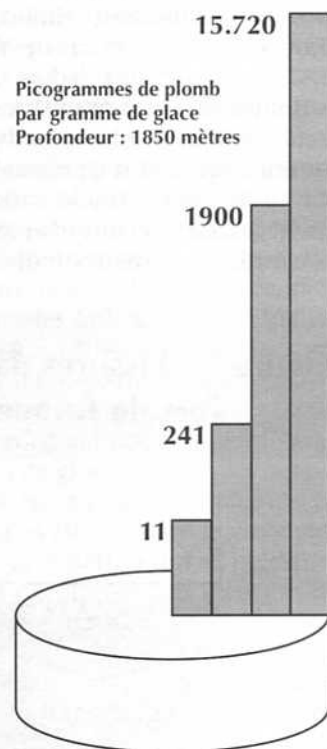
Pour différentes durées de vie de  $\text{CO}_2$  dans l'atmosphère, nous avons calculé la masse N de chaque composant restant en 1988, en utilisant l'équation suivante :

$$N = N_0 e^{-\lambda t}$$

où  $N_0$  est l'émission annuelle de  $\text{CO}_2$  (en GtC) au temps t (en années avant décembre 1988), émission industrielle ou naturelle.  $\lambda$  est la constante de suppression (durée de vie réciproque) pour différentes durées de vie du  $\text{CO}_2$  dans l'atmosphère comprises entre 2 et 200 ans. Les calculs d'équilibre de masse isotopique démontrent que la durée de vie répondant aux critères de 1988 ( $\delta^{13}\text{C}$  de  $-7,807\text{‰}$  et masse de  $\text{CO}_2$  atmosphérique de 748 GtC), est de 5 ans seulement. Aucune autre durée de vie, plus longue ou plus courte, ne satisfait aux mesures de répartition isotopiques.

Une durée de vie de 5 ans pour le gaz carbonique dans l'atmosphère est cohérente avec de nombreuses estimations basées sur des mesures de carbone-14 atmosphérique provenant de sources naturelles et d'essais nucléaires<sup>58-59</sup>. Des quantités significatives de carbone-14 de ces essais nucléaires ont pénétré les océans en relativement peu de temps; 10 ans seulement après l'essai le plus important de 1962, on a retrouvé du carbone-14 à des profondeurs de 5000 mètres dans l'Atlantique nord<sup>60</sup>. Starr est aussi parvenu à cette estimation de la durée de vie du  $\text{CO}_2$  dans l'atmosphère à partir des variations saisonnières du  $\text{CO}_2$ <sup>61</sup>. La conséquence d'une du-

Figure 8 - Contamination des échantillons de glace par le liquide de forage



La distribution radiale de la pollution par le plomb de la carotte glaciaire de Vostok, à une profondeur de 1850 mètres, montre des concentrations de plomb entre dix et cent mille fois plus importantes que celles mesurées à proximité dans la neige récente de surface, et qui s'étendent de 2,3 à 7,4 picogrammes de plomb par gramme de glace.

Source : adapté de Boutron et al. 1990.

rée de vie de 5 ans est qu'environ 18% du  $\text{CO}_2$  atmosphérique — soit 135 GtC de la teneur en  $\text{CO}_2$  atmosphérique — est échangé chaque année. Les 6 GtC d'origine anthropique font pâle figure à côté de cet important flux naturel.

Ce qui ressort également de nos calculs, c'est que, dans l'atmosphère de décembre 1988, tout ce qui reste des émissions passées dues à la combustion d'énergie fossile s'élève à environ 30 GtC — c'est-à-dire 4% (et non pas 21%) de la teneur totale en

CO<sub>2</sub> atmosphérique pour 1988, ce qui correspond à une concentration de 14 ppmv de CO<sub>2</sub> atmosphérique. La teneur en CO<sub>2</sub> atmosphérique avec un δ<sup>13</sup>C de -7‰ — c'est-à-dire ni d'origine fossile ni biogénique — s'élevait en décembre 1988 à environ 718 GtC. Cela correspond à une concentration de CO<sub>2</sub> atmosphérique préindustrielle de 339 ppmv. La part due à la combustion de l'énergie fossile serait moindre si l'on prenait en compte le biote terrestre qui a un δ<sup>13</sup>C semblable. Les estimations effectuées par Guthrie et Smith<sup>62</sup> des 35 GtC restants (émissions de CO<sub>2</sub> issu des combustibles fossiles entre 1860 et 1990) à partir des calculs d'équilibre de masse non isotopiques, ainsi que les 5,1 années de durée de vie du CO<sub>2</sub> atmosphérique, sont proches de nos résultats.

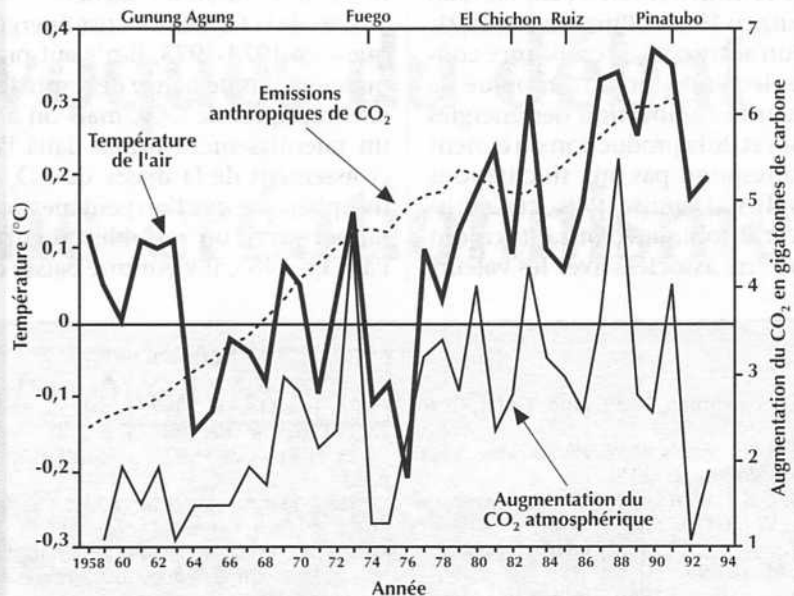
La teneur actuelle en CO<sub>2</sub> atmosphérique vient principalement de CO<sub>2</sub> naturel, avec un δ<sup>13</sup>C de -7‰, dégazé à partir de l'océan. La contribution de l'homme, qui représente 4% du total, est probablement inférieure aux variations annuelles des flux de CO<sub>2</sub> d'origine naturelle provoquées par les instabilités climatiques.

### La croissance du CO<sub>2</sub> n'est pas le résultat de l'activité humaine

La concentration en CO<sub>2</sub> atmosphérique a augmenté de 315,6 ppmv en 1958 à 359 ppmv en 1994<sup>7-63</sup>. Ces concentrations correspondent respectivement à des masses de CO<sub>2</sub> atmosphérique de 669 GtC et 761 GtC, la croissance de ces 37 années a donc été de 92 GtC, c'est-à-dire environ 14% de la masse de CO<sub>2</sub> atmosphérique en 1958. La croissance annuelle moyenne de cette période était donc d'environ 2,5 GtC/an.

Chaque année, environ 12% (soit 92 GtC) de la masse totale de CO<sub>2</sub> atmosphérique est échangée dans les océans, et environ 13% (102 GtC) avec le biote terrestre (GIEC 1990). Il est possible que l'accroissement observé de CO<sub>2</sub> soit le résultat d'une faible modification de ces flux annuels de CO<sub>2</sub> naturel, attribuable à un dégazage plus important de l'océan plus chaud, ainsi qu'à des processus d'oxydation plus impor-

Figure 9 - Les variations du volume du CO<sub>2</sub> atmosphérique suivent celles des températures



La croissance des émissions anthropiques de CO<sub>2</sub> (ligne pointillée) ne suit pas les variations du CO<sub>2</sub> atmosphérique (ligne fine). Au contraire, les zigzags de la courbe du CO<sub>2</sub> atmosphérique semblent bien suivre les changements de température (ligne grasse). Les plus importantes baisses de CO<sub>2</sub> interviennent après des éruptions volcaniques atteignant la stratosphère. Les éruptions volcaniques sont indiquées en haut.

Nous avons repris de Boden et al., 1990 et Andres et al. 1993 les chiffres des émissions anthropiques de CO<sub>2</sub>. Les données du CO<sub>2</sub> libre ont été mesurées à Maura Loa (Hawaï) par Boden et al. 1990 et Keeling et al. 1995. La température de surface est reprise de Boden et al 1990 et Keeling et al 1995.

tants, en mer et sur terre, du fait de variations climatiques naturelles. Cette possibilité n'a pas été discutée dans le document du GIEC de 1990.

Le GIEC estime que la température des eaux de surface a augmenté d'environ 0,6°C entre 1910 et 1988. Pendant cette même période, une augmentation similaire a été observée pour les températures de l'air de surface. L'accroissement de la température moyenne des eaux océaniques de surface (15°C) de 0,6°C aurait fait baisser la solubilité du CO<sub>2</sub> dans ces eaux (0,1970 g de CO<sub>2</sub> par 100 g) d'environ 2%. Le flux de CO<sub>2</sub> libéré dans l'atmosphère par l'océan devrait croître d'un même facteur, c'est-à-dire 1,9 GtC par an. Cela ressemble bien à la croissance en CO<sub>2</sub> observée entre 1958 et 1968 de 0,73 ppmv/an<sup>7</sup>, correspondant à 1,6 GtC/an. Les accroissements annuels mesurés de CO<sub>2</sub> atmosphérique pendant les deux

décennies suivantes furent plus élevés (2,5 GtC/an et 3,4 GtC/an)<sup>7</sup>, ce qui montre que les changements de solubilité du CO<sub>2</sub> dans l'océan n'expliquent pas tout. Les processus inorganiques sur terre et les modifications des biotopes terrestre et marin pourraient également contribuer à ces augmentations de CO<sub>2</sub>.

Les températures atmosphériques de surface en mer et sur terre n'ont pas varié graduellement durant cette période, elles ont plutôt zigzagué d'année en année (Figure 9). L'évolution annuelle de la masse du CO<sub>2</sub> atmosphérique a suivi de près celle des températures. Ceci semble être le résultat d'un équilibre rapide entre la concentration de CO<sub>2</sub> dans l'atmosphère et le carbone inorganique dissous dans la mer en environ neuf mois<sup>64</sup>.

Les refroidissements les plus importants et les plus fortes baisses du



taux de croissance de CO<sub>2</sub> atmosphérique ont eu lieu après des éruptions volcaniques atteignant la stratosphère, éruptions caractérisées par de grandes quantités de poussières projetées : Cunug Agung en 1963, Fuego en 1974, El Chichon en 1982, Nevado del Ruiz en 1985 et Pinatubo en 1991.

D'un autre côté, la croissance continue de l'émission anthropique de CO<sub>2</sub> par la combustion des énergies fossiles et de la production du ciment ne correspond pas aux fluctuations naturelles. Depuis 1988, ces émissions anthropiques croissantes n'ont pas pu être associées avec les valeurs

décroissantes de δ<sup>13</sup>C du CO<sub>2</sub> atmosphérique<sup>63</sup> ; entre 1988 et 1994, sept années, cette dernière valeur est restée remarquablement stable. Si les changements observés de la concentration en CO<sub>2</sub> étaient dus à l'homme, le δ<sup>13</sup>C aurait dû baisser.

Lors de la fameuse « crise énergétique » de 1974-1975, il n'y eut pratiquement pas de baisse des émissions anthropiques de CO<sub>2</sub>, mais on a vu un ralentissement brutal dans l'accroissement de la masse de CO<sub>2</sub> atmosphérique que l'on peut mettre en rapport avec un refroidissement de l'air. En 1983, il y eut une baisse des

émissions anthropiques de CO<sub>2</sub>, mais on observa un pic du taux de croissance de la masse de CO<sub>2</sub> atmosphérique, et ce, après une température plus froide en 1982. En 1992, un des plus hauts taux d'émissions anthropiques de CO<sub>2</sub> correspondit à l'un des plus importants ralentissements de la croissance du CO<sub>2</sub> atmosphérique et à un refroidissement de l'air.

Les données de la figure 9 suggèrent que la croissance de la masse de CO<sub>2</sub> atmosphérique n'est pas liée à l'activité de l'homme mais plutôt aux éruptions volcaniques et autres fluctuations climatiques naturelles. ■

### Références

1. I. Langmuir, 1989. *Phys. Today*, Octobre p. 36.
2. S. Arrhenius, 1896. *Philos. Mag. J. Sci.*, Ser. 5, Vol. 41, p. 237.
3. G.S. Callendar, 1938. *Q.J.R. Meteorol. Soc.*, Vol. 64, p. 223.
4. \_\_\_\_\_, 1940. *Q.J.R. Meteorol. Soc.*, Vol. 66, p. 395.
5. \_\_\_\_\_, 1958. *Tellus*, Vol. 10, p. 243.
6. G. Slocum, 1955. *Mon. Weather Rev.* (Octobre), p. 225.
7. T.A. Boden et al., 1992. *Trends '90*, Report ORNL/CDIAC-36, p. 257.
8. Z. Jaworowski et al., 1992. *Atmospheric CO<sub>2</sub> and Global Warming: a Critical Review*, Norwegian Polar Institute, Oslo, *Meddelelser*, Vol. 19, N°1 p. 76.
9. J. Emsley, ed 1996. *The Global Warming Debate* (London : European Science and Environment Forum), p. 288.
10. « International Commission Report of the Workshop on Snow and Ice » held March 6-7, 1992, at the University of New Hampshire, p. 17.
11. Intergovernmental Panel on Climate Change, 1990. « Climate change : The Intergovernmental Panel on Climate Change Scientific Assessment » p. 365.
12. Z. Jaworowski et al., 1992. *The Sci. Tot. Environ.*, Vol. 114, p. 227.
13. H. Oeschger et al, 1988. *Ann. Glaciol.*, Vol. 10 p. 215.
14. I.G. Enting, 1992. *Tellus*, Vol. 44B, p. 23.
15. I.G. Enting et al, 1987. *Tellus*, Vol. 39B, p. 318.
16. G. Landmann et al, 1996. *Palaeogeogr. Palaeoclimat. Palaeoecol.*, Vol. 122, p. 107.
17. W. Dansgaard, 1954. *Geochim. Cosmochim. Acta*, Vol. 6, p. 436.
18. \_\_\_\_\_, 1977. IAHS Publication n° 118, p. 401.
19. K. Satow et al, 1985. *Ann. Glaciol.*, Vol. 6, p. 256.
20. G. Heinssohn, 1994. *Vorzeit-Frühzeit-Gegenwart*, Vol. 4, p. 76.
21. J. Schwander et al, 1993. *J. Geophys. Res.*, Vol. 98, p. 2831.
22. Z. Jaworowski, 1994. *Environ. Sci. & Pollut. Res.*, Vol. 1, p. 162.
23. A. Neftel et al, 1982. *Nature*, Vol. 295, p. 220.
24. H-E Heyke, 1992. *Erdöl und Kohle-Erdgs-Petrochemie*, Vol. 45, p. 360.
25. H-E Heyke, 1992. *Fusion* (RFA), n° L3, p. 32.
26. Z. Jaworowski et al., 1996. « Reliability of Ice Core Records for Climatic Projections » In *The Global Warming Debate* (London : European Science and Environment Forum), p. 95.
27. Z. Jaworowski et al., 1991. *Atmospheric CO<sub>2</sub> and Global Warming : a Critical Review* (Oslo : Norsk Polarinstitut, Rapportserie n° 59), pp. 1-75.
28. Z. Jaworowski et al., 1992. *Atmospheric CO<sub>2</sub> and Global Warming : a Critical Review* (Oslo : Norsk Polarinstitut, second revised edition), *Meddelelser*, n° 119, pp. 1-76.
29. A. Neftel et al, 1988. *Nature*, Vol. 331, p. 609.
30. G.I. Pearman et al, 1986. *Nature*, Vol. 320, p. 248.
31. M. Leuenberger et al, 1992. *Nature*, Vol. 360, p. 449.
32. D.M. Etheridge et al, 1988. *Ann. Glaciol.*, Vol. 10, p. 1.
33. D. Zardini et al, 1989. *J. Atmos. Chem.*, Vol. 8, p. 189.
34. H. Oeschger et al, 1984. *Geophysical Monographs*, Vol. 32, p. 132.
35. D. Raynaud et al, 1985. *Nature*, Vol. 315, p. 309.
36. J. Schwander et al, 1985. *Nature*, Vol. 311, p. 45.
37. D. Raynaud et al, 1993. *Science*, Vol. 259, p. 926.
38. R. Mulvaney et al, 1988. *Nature*, Vol. 331, p. 247.
39. S. Wróblewski, 1882. *Compt. Rend.*, Vol. 24, p. 212.
40. S. Wróblewski, 1882. *Compt. Rend.*, Vol. 24, p. 954.
41. A. Neftel et al, 1983. *J. Phys. Chem.*, Vol. 87, n° 41, p. 16.
42. Y.F. Makagon, 1974. *Gidraty Prirodnikh Gazov* (Moscow), p. 208.
43. H. Shoji et al, 1982. *Nature*, Vol. 298, p. 548.
44. H. Craig et al, 1988. *Science*, Vol. 242, p. 1535.
45. A. Neftel, 1991. *Seasonal Snowpacks* (Berlin), p. 386.
46. W. Berner et al, 1980. *Radiocarbon*, Vol. 22, p. 227.
47. H. Craig et al, 1982. *Geophys. Res. Lett.*, Vol. 2, p. 1221.
48. H. Craig et al, 1988. *Science*, Vol. 242, p. 1535.
49. S.H. Schneider, 1989. *Sci. Am.*, Vol. 261, p. 38.
50. J.M. Barnola et al, 1987. *Nature*, Vol. 329, p. 408.
51. C.F. Boutron et al, 1990. *Earth Planet. Sci. Lett.*, Vol. 101, p. 248.
52. A.N. Fuex and D.R. Baker, 1973. *Geochim. Cosmochim. Acta*, Vol. 37, pp. 2509-2521.
53. H. Ohmoto, 1986. *MSA Rev. Mineral.*, Vol. 16, pp. 491-559.
54. C.D. Keeling, W.G. Mook and P.P. Tans, 1979. *Nature*, Vol. 277, pp. 121-123.
55. C.D. Keeling et al, 1989. *Geophys. Mono.*, Vol. 55, pp. 165-236.
56. P. Tans, 1981. « Carbon Cycle Modelling, SCOPE 16 » (Chichester : John Wiley & Sons), pp. 127-129.
57. T.V. Segalstad and Z. Jaworowski, 1991. « Carbon Isotope Mass Balance of Atmospheric CO<sub>2</sub> » University of Oslo, unpublished.
58. UNSCEAR, 1977. « Sources and Effects of Ionizing Radiation » United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiations, report to the general Assembly (New York : United Nations), p. 725.
59. E.T. Sundquist, 1985. « Geological Perspectives on Carbon Dioxide and the Carbon Cycle » in E.T. Sundquist and W.S. Broecker (eds.), *The Carbon Cycle and Atmospheric CO<sub>2</sub> : Natural Variations Archean to Present*, AGU Geophysical Monograph, Vol. 18, pp. 1297-1310.
60. B. Bolin, 1989. « How Much CO<sub>2</sub> Will Remain in the Atmosphere ? », *SCOPE* 29 (Chichester : John Wiley & Sons) pp. 93-155.
61. C. Starr, 1993. *Energy*, Vol. 18, pp. 1297-1310.
62. M.B. Guthrie and S.P. Smith, 1993. Appendix in Starr (see Reference 61).
63. C.D. Keeling et al, *Nature*, Vol. 375, pp. 666-670.
64. B. Bolin, 1982. « Changing Global Biogeochemistry » In P.C. Brewer (ed.) *Oceanography : The Present and Future* (New York : Springer Verlag), pp. 306-326.
65. O. Watanabe, 1977. *JARE Data Reports n° 36* (Glaciology), (Tokyo : National Institute of Polar Research), pp. 61-138.